



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Σπινθηρισμοί σε αγωγούς, μονωτήρες και στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Κ. Μυλωνά

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2013

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
---------------	---

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη της διηλεκτρικής και μονωτικής συμπεριφοράς των αγωγών , των μονωτήρων και των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων σε περιπτώσεις εκδήλωσης σπινθηρισμών καθώς και τους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν στην εμφάνιση των μερικών εκκενώσεων. Για το σκοπό αυτό διερευνάται η συμπεριφορά τους και η ασφάλεια της χρήσης τους στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των χαρακτηριστικών των αγωγών και μονωτήρων του εναέριου δικτύου μεταφοράς και διανομής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή του φαινομένου εμφάνισης σπινθηρισμών επί μονωτήρων και περι αγωγών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν την εμφάνιση σπινθηρισμών επί μονωτήρων και περι αγωγών. Αναλύονται επίσης οι ιδιότητες των υλικών των μονωτήρων σε σχέση με την εκδήλωση σπινθηρισμών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των ηλεκτρικών συνδέσμων και έπειτα αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ασφαλή λειτουργία των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων καθώς και τα μη γραμμικά φαινόμενα που εκδηλώνονται στις ηλεκτρικές επαφές.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to study the dielectric and insulating behavior of conductors, insulators and static electrical contacts in the event of appearance of electrical spark phenomenon, including the external factors affecting the occurrence of partial discharges. For this purpose, is investigating the behavior and safety of their use in the transmission and distribution of electricity.

In the first chapter are reviewed the characteristics of conductors and insulators of overhead transmission and distribution network.

The second chapter includes an extensive analysis of the electrical sparks appearance on insulators and conductors.

The third chapter contains a detailed presentation of the factors that affect the appearance of electrical sparks on insulators and conductors. Also are analyzed the material properties of insulators in relation to partial discharges.

In the fourth chapter is given an overview of the electrical connector and analyzing the factors that affect the safe operation of static electrical connectors and non-linear phenomena occurring in electrical contacts.

**1. Μονωτήρες και
αγωγοί Δικτύου
Μεταφοράς και Διανομής
Ηλεκτρικής Ενέργειας**

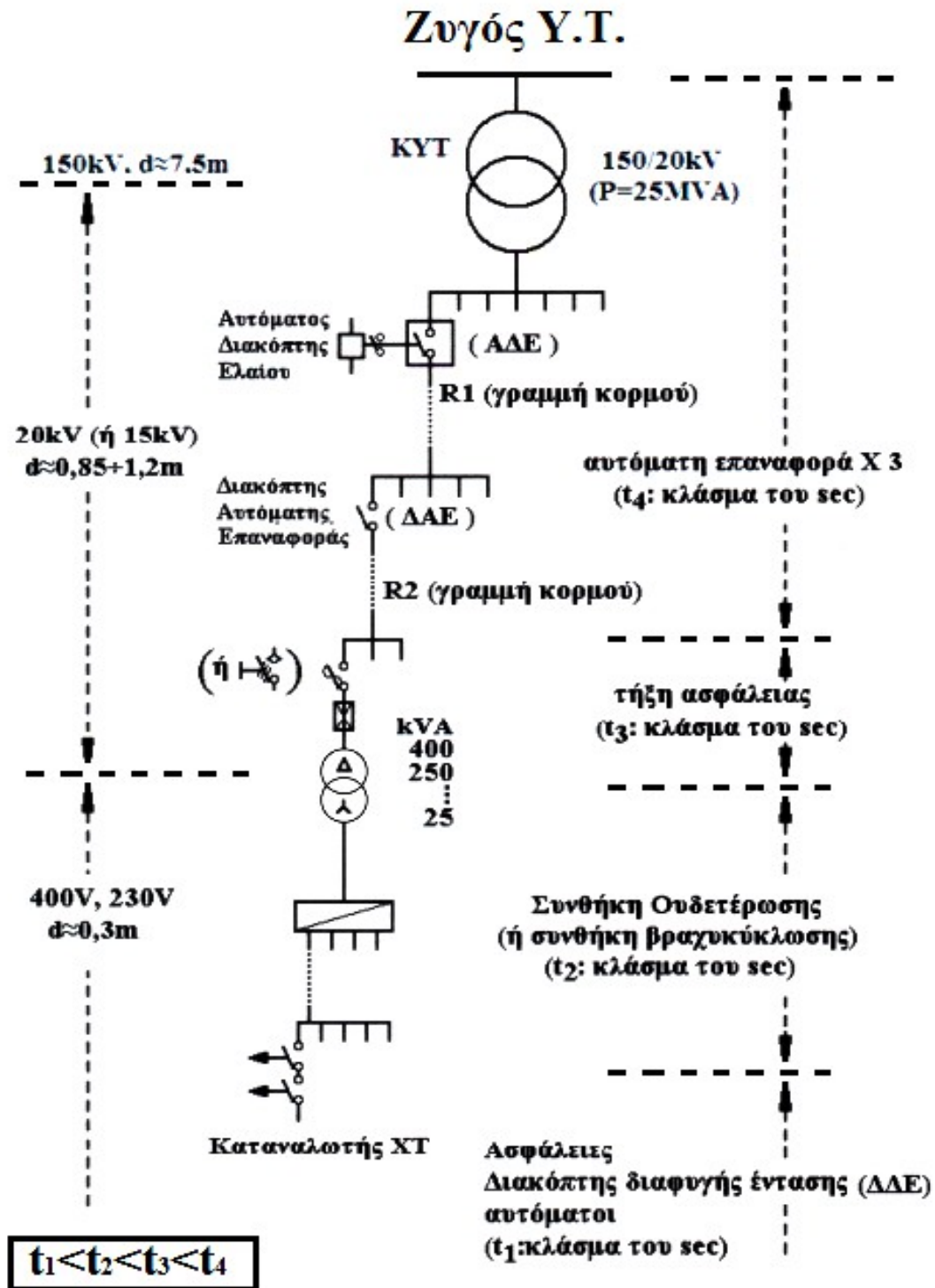
1.1 Γενικά περί εναέριων δικτύων

Το εναέριο δίκτυο μέσης τάσης (MT) αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών στοιχείων (αγωγούς, διακόπτες, ασφάλειες) τα οποία είναι διατεταγμένα σε δενδροειδή μορφή (σχήμα 1.1-1). Από το ζυγό υψηλής τάσης (YT) μέσω ενός μετασχηματιστή 150/20kV στο κέντρο υψηλής τάσης (KYT) υποβιβάζεται η τάση. Στο ζυγό MT μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) αναχωρούν γραμμές MT οι οποίες ονομάζονται γραμμές κορμού και κατασκευάζονται από αγωγούς μεγάλης διατομής. Κατα μήκος των γραμμών και στα σημεία έναρξης μεγάλων κλάδων τοποθετούνται διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ). Οι διακλαδώσεις των γραμμών κορμού καταλήγουν σε υποσταθμούς (Υ/Σ) υποβιβασμού της τάσης σε χαμηλή (XT).

Κατα μήκος του ακτινικού δικτύου εγκαθίστανται μέσα ζεύξεως όπως αποζεύκτες και διακόπτες φορτίου και μέσα προστασίας όπως διακόπτες ισχύος, διακόπτες απομονώσεως και ασφάλειες. Τα μέσα ζεύξεως χρησιμεύουν για την διασύνδεση ή απομόνωση τμημάτων του δικτύου, ενώ τα μέσα προστασίας για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος (πχ βραχυκύκλωμα). Η έκθεση των εναέριων δικτύων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες προκαλεί αυξημένη εμφάνιση σφαλμάτων, εκ των οποίων το 80% είναι παροδικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα διακρίνονται τέσσερις ζώνες προστασίας:

- Ζώνη γραμμών MT
- Ζώνη υποσταθμών MT (Δικτύου διανομής ή ιδιοτικοί)
- Ζώνη γραμμών XT
- Ζώνη ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων των καταναλωτών

Στην αρχή κάθε ζώνης υπάρχει ένα μέσον προστασίας ώστε να μπορεί να απομονωθεί το τμήμα αυτό του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος. [1,2]



Σχήμα 1.1-1: Διάγραμμα δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

1.2 Αγωγοί εναέριων δικτύων

Στα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί χωρίς μόνωση, από χαλκό, αλουμίνιο ή συνδυασμό αλουμινίου με χάλυβα. Οι

αγωγοί των δικτύων είναι πολύκλωνοι. Οι μονόκλωνοι αγωγοί είναι σπάνιοι στα εναέρια δίκτυα γιατί έχουν μικρή μηχανική αντοχή και είναι δύσκαμπτοι, σε αντίθεση με τους πολύκλωνους.

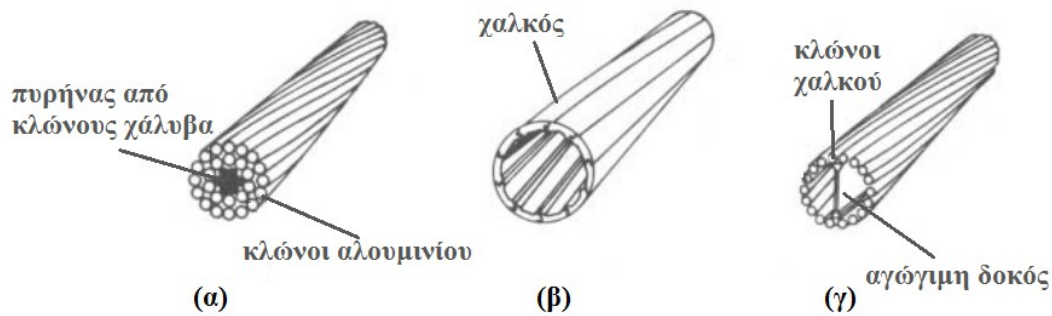
Οι αγωγοί εναέριων δικτύων αποτελούνται κυρίως από αλουμίνιο, ενώ στις παραθαλάσσιες περιοχές προτιμάται ο χαλκός. Ο χαλκός έχει μεγάλη μηχανική αντοχή και υψηλή αγωγιμότητα. Ένα μεγάλο όμως μειονέκτημα είναι το μεγάλο βάρος του. Το αλουμίνιο αντιθέτως είναι ελαφρύτερο και οικονομικότερο, έχει όμως μικρότερη μηχανική αντοχή και χαμηλότερη αγωγιμότητα απ' ότι ο χαλκός. Ο αγωγός αλουμινίου δέχεται μεγαλύτερες επιφορτίσεις από τον άνεμο και τον πάγο λόγω της ευρύτερης επιφάνειάς του, όμως περιορίζει τις απώλειες από το φαινόμενο Corona όπως θα εξετάσουμε παρακάτω.

Οι αγωγοί χαλκού μπορεί να είναι απλοί κοίλοι αγωγοί ή αγωγοί με κλώνους χαλκού και ενσωματωμένη διαμήκη αγωγήμη δοκό (σχήμα 1.2-1-β,γ)

Οι αγωγοί αλουμινίου (σχήμα 1.2-2-β) αποτελούνται από υλικό η επιφάνεια του οποίου οξειδώνεται υπό φυσιολογικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σε έντονες συνθήκες όπως σε υγρασία και άλμη (πχ σε παραθαλάσσιες περιοχές) η επιφάνειά του μπορεί να διαβρωθεί από την άλμη έως και 3mm. Για αυτό τον λόγο είναι κατάλληλοι για περιοχές μακριά από τη θάλασσα. Η χρήση τους είναι ευρεία στις γραμμές χαμηλής τάσης, όχι όμως και στις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης διότι έχουν μικρή μηχανική αντοχή και οι πυλώνες σε αυτά τα δίκτυα απέχουν μεγάλες αποστάσεις με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται στους αγωγούς μεγάλες δυνάμεις.

Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό δημιουργήθηκαν αγωγοί με συνδυασμό αλουμινίου και χάλυβα (σχήμα 1.2-1-α). Η σύνθεση αυτή έχει τα πλεονεκτήματα του αλουμινίου, μειωμένο βάρος κατά 20% και επιπλέον αυξημένη κατά 50% μηχανική αντοχή, με αποτέλεσμα να είναι συγκρίσιμο με το χαλκό. Οι αγωγοί των γραμμών του δικτύου δεν είναι συμπαγείς, αλλά αποτελούνται από συνεστραμμένους κλώνους για να είναι πιο εύκαμπτοι. Έτσι προέκυψε η δημιουργία αγωγών αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR Aluminum Conductor Steel Reinforced), δηλαδή αγωγών με ενσωματωμένους κλώνους γαλβανισμένου χάλυβα μέσα σε αγωγό από κλώνους αλουμινίου, με αποτέλεσμα την βελτίωση της συνολικής μηχανικής αντοχής του αγωγού. Οι σύνθετοι αυτοί αγωγοί αποτελούνται από έναν πυρήνα με κλώνους χάλυβα, οι οποίοι είναι

διατεταγμένοι σε στρώματα. Γύρω από τον πυρήνα είναι διατεταγμένα στρώματα κλώνων αλουμινίου (σχήμα 1.2-1-α, σχήμα 1.2-2-α).



Σχήμα 1.2-1: Αγωγοί γραμμών μεταφοράς

(α): Αγωγός ACSR

(β): Κοίλος αγωγός χαλκού

(γ): Κοίλος αγωγός χαλκού με ενσωματωμένη αγώγιμη δοκός



(α)



(β)

Σχήμα 1.2-2: Αγωγοί γραμμών μεταφοράς

(α): ACSR αγωγοί διαφόρων διατομών

(β): Αγωγός αλουμινίου

Στον παρακάτω πίνακα παρατείθενται τα χαρακτηριστικά διαφόρων ειδών γυμνών αγωγών που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στα εναέρια δίκτυα (Πίνακας 1.2-1). [1,2]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΜΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ				
Διατομή Αγωγών mm ²	Βάρος Kg/m	Διάμετρος mm	Σπάνοι mm	Φορτίο θραύσεως Kg
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΣΑΛΥΒΑΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR)				
16	0,102	6,96	6A1/1St/2,32	950
35	0,224	10,32	6A1/1St/3,44	2000
50	0,321	12,33	6A1/1St/4,11	2800
95	0,609	17,24	26/2,72A1+7/2,12St	5650
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΣΥΝΙΣΤΗΜΕΝΗ ΣΑΛΥΒΑΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR-R)				
16	0,372	10,32	3A1/4St/3,44	4635
ΑΓΩΓΟΙ ΕΚ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AAAC)				
35	0,098	7,50	7/2,50	980
70	0,189	10,50	19/2,10	1880
95	0,269	12,50	19/2,50	2670
185	0,525	17,50	37/2,50	5170
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (A1)				
16	0,074	6,63	7/2,21	470
35	0,158	9,66	7/3,22	940
50	0,229	11,75	19/2,35	1442
70	0,320	13,90	19/2,78	2018
ΑΓΩΓΟΙ ΣΑΛΚΟΥ (Cu)				
16	0,144	5,13	7/1,71	739
35	0,315	7,59	7/2,53	1566
50	0,453	9,20	19/1,83	2299
70	0,634	10,70	19/2,17	3162

Πίνακας 1.2-1: Χαρακτηριστικά αγωγών εναέριου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

1.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα αγωγού μέσης τάσης

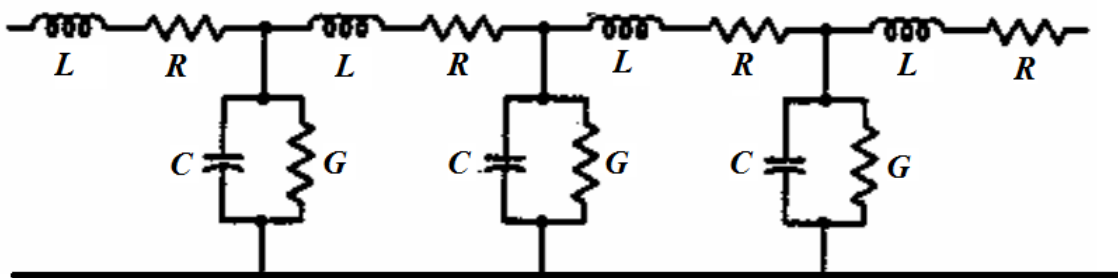
Οι αγωγοί μέσης τάσης μπορούν να παρασταθούν με μία σύνθετη αντίσταση αποτελούμενη από μία επαναλαμβανόμενη ακολουθία μίας ωμικής αντίστασης, R , που εξαρτάται από το μήκος της γραμμής, την διατομή και το υλικό του αγωγού, μίας επαγωγικής αντίδρασης, X_L , που συνδέεται με την γωνιακή ταχύτητα μέσω της σχέσης $X_L = \omega L$, μίας παράλληλης χωρητικής αντίδρασης, C , που αναπαριστά τη χωρητικότητα μεταξύ των φάσεων και τη χωρητικότητα μεταξύ φάσεων και γης και μίας παράλληλης αγωγιμότητας, G , που υφίσταται λόγω του διηλεκτρικού υλικού που χωρίζει τους αγωγούς (σχήμα 1.2.1-1). Η ωμική αντίσταση

εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος (συχνότητα και πυκνότητα). Αν γνωρίζουμε για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, T_1 , την αντίσταση ενός αγωγού, $R(T_1)$, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση, $R(T_2)$, σε κάθε άλλη θερμοκρασία, T_2 , μέσω της σχέσης:

$$R(T_2) = R(T_1) [1 + a(T_2 - T_1)]$$

Όπου

- α: ο συντελεστής θερμοκρασίας του αγωγού ο οποίος για το αλουμίνιο είναι $0,0037 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.



Σχήμα 1.2.1-1: Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμών μεταφοράς

1.2.2 Επιδερμικό φαινόμενο στους αγωγούς

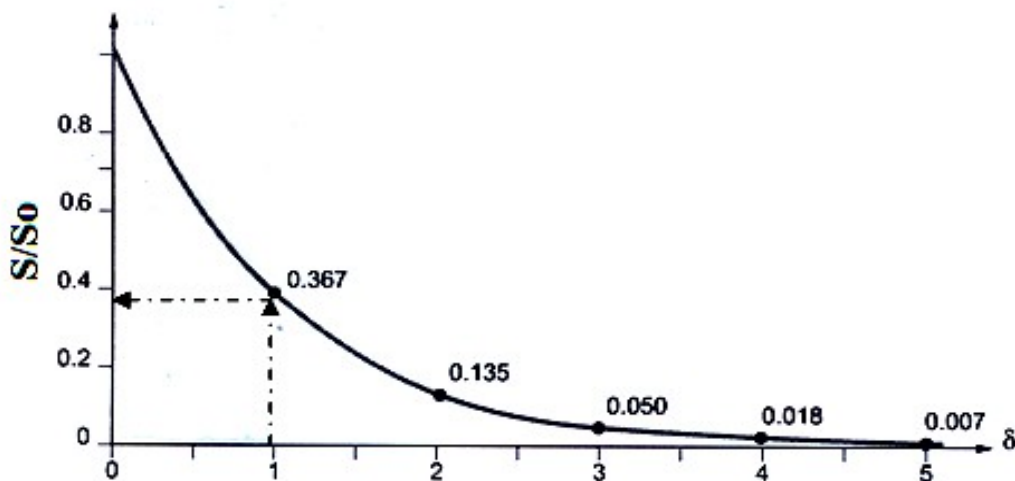
Στο συνεχές ρεύμα η αντίσταση του αγωγού παραμένει σταθερή σε αντίθεση με το εναλλασσόμενο ρεύμα όπου η ωμική αντίσταση αυξάνεται λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Κατα το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μια διαφορά στην τιμή της αντίστασης του αγωγού που οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος στην διατομή του. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο αυτό προκαλείται από ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και κατά συνέπεια από μία χρονικά μεταβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος, η οποία δημιουργεί ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Εν συνεχεία, επαγωγικά φαινόμενα εξωθούν το ρεύμα προς την επιφάνεια του αγωγού με αποτέλεσμα τη μείωση της

πυκνότητας του ρεύματος στο εσωτερικό του (σχήμα 1.2.2-1). Με την ανομοιομορφία αυτή και το χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα δημιουργείται επαγωγικό φαινόμενο το οποίο Το μέγεθος του φαινομένου αυτού μετράται ως βάθος διείσδυσης, δ , και ορίζεται ως η απόσταση δ από την επιφάνεια του αγωγού όπου η πυκνότητα ρεύματος ισούται με το $1/e$ της αρχικής τιμής S_0 της επιφάνειάς του. Η συνάρτηση που συνδέει το βάθος διείσδυσης με τη συχνότητα είναι η παρακάτω:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

Όπου:

- f : η συχνότητα
- ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού
- μ : η μαγνητική διαπερατότητα



Σχήμα 1.2.2-1: Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους διείσδυσης

Στα 50Hz , για συνήθεις διατομές αγωγών παρατηρείται μικρή αύξηση της αντίστασης, περίπου 1%, για αυτό και θεωρείται αμεληταία. Όλες οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος της γραμμής διανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος της και είναι ανάλογες της απόστασης των σημείων στήριξης του αγωγού και όχι του πραγματικού μήκους της.

Για τους αγωγούς στα δίκτυα μέσης τάσης και για διάφορες διατομές, οι αντίστοιχες τιμές ωμικής αντίστασης, επαγωγικής αντίδρασης και χωρητικότητας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (1.2.2-1) [1,2]:

ΑΓΩΓΟΙ	$Z_1=Z_2=R+jX$		$Y_1=Y_2$	$Z_0=R_0+jX_0$		$Y_0=j\omega C_0$	$Z_c=$	I_{max} (A)
	R	X	C	R ₀	X ₀	C ₀	Z _c	
16 ACSR	1,268	0,422	9,248	1,416	1,620	4,388	1,317+j0,821	136
35 ACSR	0,576	0,397	9,896	0,724	1,595	4,518	0,625+j0,796	224
50 ACSR	0,404	0,386	10,220	0,552	1,584	4,587	0,453+j0,785	295
95 ACSR	0,215	0,334	10,890	0,363	1,556	4,712	0,264+j0,741	448
95 ACSR (δυσλή)	0,108	0,160	20,970	0,256	1,363	5,966	0,157+j0,561	896
35 AAAC	1,071	0,393	9,364	1,219	1,616	4,406	1,120+j0,801	160
70 AAAC	0,562	0,370	9,927	0,710	1,592	4,527	0,611+j0,777	240
185 AAAC	0,204	0,337	10,922	0,352	1,559	4,723	0,253+j0,744	462
16 Cu	1,274	0,417	8,802	1,422	1,639	4,292	1,323+j0,824	115
35 Cu	0,596	0,393	9,383	0,744	1,615	4,443	0,645+j0,800	185
50 Cu	0,426	0,377	9,698	0,574	1,600	4,510	0,475+j0,785	232
95 Cu	0,220	0,358	10,268	0,368	1,580	4,629	0,269+j0,765	352
95 Cu (δυσλή)	0,110	0,172	19,817	0,258	1,375	5,922	0,159+j0,573	704
16 ACSR-R	1,150	0,397	9,896	1,298	1,600	4,507	1,199+j0,798	148
3x50 Al+50 St	0,823	0,150	146	1,689	1,589	146	1,112+j0,630	123
3x150Al+50 St	0,266	0,125	217	1,183	1,395	217	0,572+j0,548	241
3x150 Al NAEKBA	0,245	0,116		1,117	0,616		0,536+j0,283	233
3x240 Al NAEKBA	0,150	0,108	530	1,083	0,585	530	0,461+j0,267	310
3x240 Al+	0,162	0,115	270	1,092	0,800	270	0,472+j0,343	410
1x50 Al υποβρ.	0,739	0,619	235	3,695	1,857	235	1,724+j1,032	203
1x50Cu υποβρ.	0,388	0,645	247	1,940	1,935	247	0,905+j1,075	228
1x95 Cu υποβρ.	0,215	0,626	296	1,075	1,878	296	0,502+j1,043	300
3x35 Al υποβρ.	1,035	0,115	226	5,175	0,345	226	2,415+j0,192	145
3x35 CU υποβρ.	0,617	0,115	226	3,085	0,345	226	1,440+j0,192	190
3x50 Al υποβρ.	0,757	0,112	280	3,785	0,336	280	1,766+j0,187	170
3x150Al υποβρ.	0,243	0,079	373	1,215	0,237	373	0,567+j0,132	300
3x95 Cu υποβρ.	0,248	0,125	296	0,620	0,210	296	0,372+j0,153	350

Πίνακας 1.2.2-1: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αγωγών μέσης τάσης

1.3 Μονωτήρες

Το δίκτυο Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας υψηλής και μέσης τάσης αποτελούνται κυρίως από υπαίθριες εγκαταστάσεις όπως υποσταθμοί και γραμμές μεταφοράς. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις ο ατμοσφαιρικός αέρας λειτουργεί ως το κύριο μέσο μόνωσης, ο οποίος έχει βασικά πλεονεκτήματα όπως ότι έχει μηδενικό κόστος με αποτέλεσμα την οικονομική κατασκευή εγκαταστάσεων με τάση έως και 1000kV.

Ο αέρας όμως δεν είναι το μοναδικό μονωτικό μέσο που χρησιμοποιείται. Διαφόρων ειδών μονωτήρες χρησιμεύουν για την ηλεκτρική απομόνωση των αγωγών μέσης και υψηλής τάσης. Η μόνωση του συστήματος μέσω μονωτήρων πρέπει να είναι αξιόπιστη γιατί σε περίπτωση αστοχίας ενός μόνο μονωτήρα μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας ένα κομμάτι έως και ολόκληρο δίκτυο. Η χρήση τους γίνεται για να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης [3].

1.3.1 Κατηγορίες μονωτήρων

Η ασφαλής μόνωση ενός δικτύου μεταφοράς ενέργειας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η αποστάσεις μεταξύ των αγωγών, τα μονωτικά υλικά, η κατάλληλη επιλογή μονωτήρων και η συντήρησή τους.

Οι μονωτήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει του υλικού τους, της χρήσης τους, του σχήματός τους, του χώρου στον οποίο χρησιμοποιούνται κτλ.

- ❖ Κατηγοριοποίηση μονωτήρων βάσει υλικού:
 - *Μονωτήρες πορσελάνης*: φτιαγμένοι από σύνθετη ύλη αργιλίου, πυριτίου και μαγνησίου. Κατάλληλοι για χρήση σε υψηλές τάσεις, αλλά χαμηλές συχνότητες.
 - *Μονωτήρες γυαλιού*: αποτελούνται από μίγμα διαφόρων πυριτικών αλάτων, κυρίως καλίου ή νατρίου και ασβεστίου. Τα λεπτά φύλλα του πάχους 10μm δημιουργούνται με την μέθοδο σύντηξης λεπτής άμμο χαλαζία σε συνδυασμό με CaCO_3 , Na_2CO_3 ή K_2CO_3 .
 - *Μονωτήρες κεραμικών υψηλής συχνότητας* : κυρίως από στεατίτη.

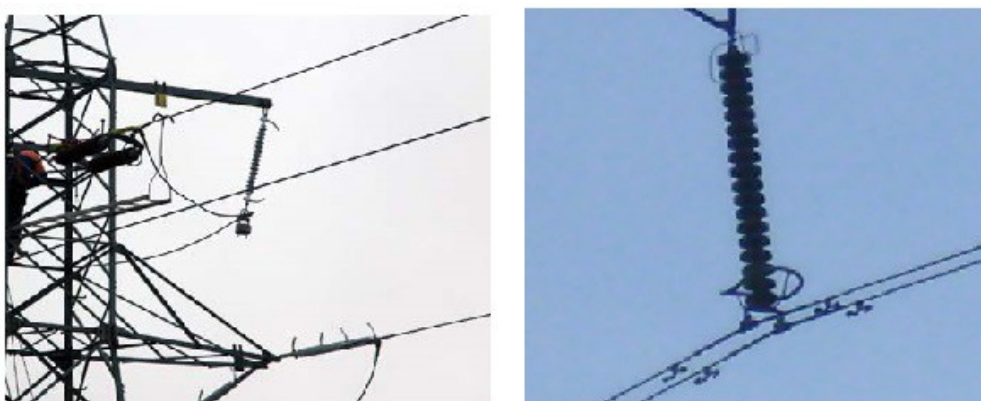
- *Μονωτηρες εποξειδικής ρητίνης:* Φθηνότερη από την πορσελάνη, αλλά υπο συνθήκες ηλεκτρικού πεδίου και ατμοσφαιρικών συνθηκών δημιουργείται αποσύνθεση με αποτέλεσμα την απελευθέρωση άνθρακα ειδικά κοντά στους οπλισμούς. Σε κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειά του γίνεται τραχιά δημιουργώντας επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα.
- *Πολυμερείς μονωτήρες:* αποτελούν την εξεληγμένη γενιά μονωτήρων. Έχουν υδρόφοβες ιδιότητες και βοηθούν στη απομάκρυνση υγρασίας και ρύπων από τον μονωτήρα. Αποτελούνται από έναν πυρήνα που μεταφέρει το μηχανικό φορτίο και είναι φτιαγμένοι από ίνες γυαλιού μέσα σε ρητίνη για μέγιστη δύναμη εφελκυσμού. Γύρο από τον πυρήνα τοποθετείται ένα ελαστομερές περίβλημα για να τον προστατεύει από τις καιρικές συνθήκες. Γύρο από αυτό τοποθετούνται ελαστομερείς δίσκοι (κυρίως από σιλικονούχο ή μονομερές καουτσούκ) οι οποίοι δημιουργούν τέτοια επιφάνεια ώστε να αυξάνεται το μήκος ερπησμού και να απωθείται η υγρασία από την επιφάνειά του. Οι μεταλλικές επαφές μεταδίδουν το μηχανικό φορτίο στον πυρήνα και μέρος τους μεταφέρει το φορτίο της γραμμής στον πύργο ή σε άλλο μονωτήρα. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες που βρίσκονται στις δύο άκρες, στερεωμένοι στο εξωτερικό του πυρήνα. Οι μονωτήρες αυτοί είναι πολύ πιο ελαφριοί από τους αντίστοιχους κεραμικούς [3].

❖ Κατηγοριοποίηση μονωτήρων βάσει της χρήσης τους:

- *Μονωτήρες ανάρτησης:* χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Αποτελούνται από μία ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων σε μορφή αλύσου, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής και την αντοχή του δισκοειδούς μονωτήρα (σχήμα 1.3.1-1)
- *Μονωτήρες στήριξης:* Αποτελούνται από ένα συμπαγή πορσελάνινο κύλινδρο με κυματοειδείς πτυχές που χρησιμεύουν στην αύξηση του μήκους ερπησμού και από μεταλλικά ηλεκτρόδια στις άκρες του. Έχουν μεγάλο μήκος και διασκρύνονται σε δύο υποκατηγορίες: μεταφοράς και σταθμών. Τοποθετούνται οριζοντίως ή καθέτως για τη στήριξη αγωγών υψηλής και στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς.

Χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ή απευθείας στους υποσταθμούς.

- *Μονωτήρες γραμμών:* χρήση σε γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έως 70kV.
- *Μονωτήρες διέλευσης:* τοποθετούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών υψηλής τάσης κυρίως από τους μετασχηματιστές ή από άλλες διατάξεις για να μονώσουν τους ακροδέκτες τους. Συνήθως είναι πορσελάνινοι και κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου ο μονωτήρας χρησιμεύει ταυτόχρονα ως μέσο διέλευσης και στήριξης των αγωγών.



Σχήμα 1.3.1-1: Μονωτήρες ανάρτησης

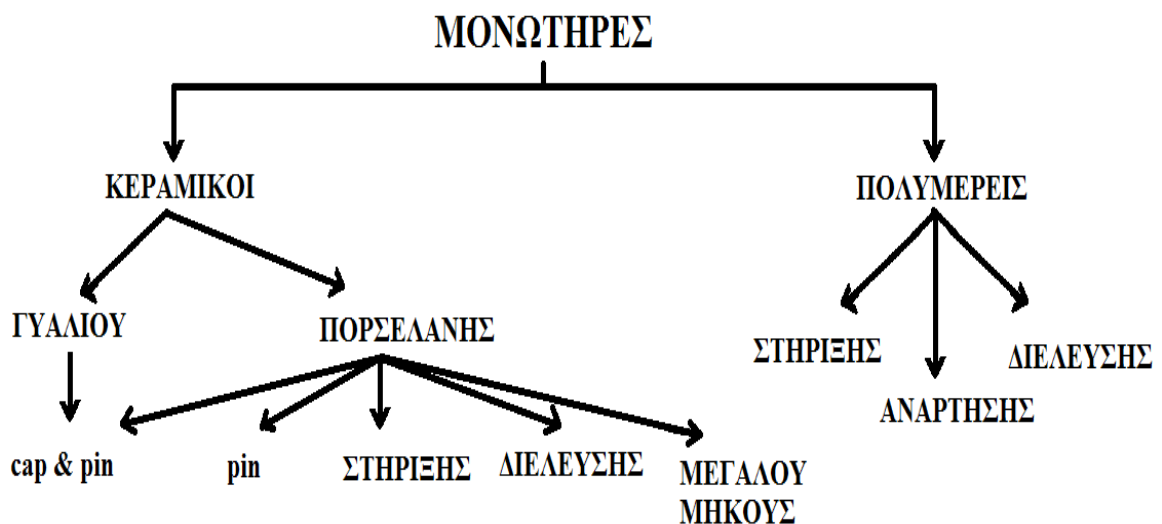
- ❖ Κατηγοριοποίηση μονωτήρων βάσει του χώρου τοποθέτησης:
 - *Τύπου ομίχλης:* κατάλληλοι για περιοχές με έντονη ρύπανση λόγω του μεγάλου μήκους ερπησμού και του πολύπλοκου γεωμετρικού τους σχήματος για την απώθηση των επικαθίμενων ρύπων.
 - *Κανικού τύπου:* το μικρό μήκος ρησμού τους τους καθιστά κατάλληλους για χώρους με συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες.
 - *Εσωτερικού τύπου:* κατάλληλοι για κλειστούς χώρους (πχ κλειστοί υποσταθμοί).
- ❖ Κατηγοριοποίηση μονωτήρων βάσει σχήματος:
 - *Τύπου pin:* αρχικά χρησιμοποιούνταν για τηλεφωνικές γραμμές και αργότερα για γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης.

- Τύπου *cap&pin*: Συνήθως είναι από πορσελάνη ή απισκληρυμένο γυαλί. Ένας αριθμός μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) δημιουργώντας μια αλυσίδα μονωτήρων (σχήμα 1.3.1-2). Ανήκουν στην κατηγορία ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 1.3.1-2: Μονωτήρες *cap & pin*

Σύμφωνα με τις παραπάνω κατηγοριοποιήσεις μπορούμε να εξάγουμε ένα απλοποιημένο διάγραμμα για τα διάφορα είδη μονωτήρων και για τη χρήση τους (σχήμα 1.3.1-3) [3].



Σχήμα 1.3.1-3: Διάγραμμα μονωτήρων

2. Σπινθηρισμοί σε μονωτήρες και αγωγούς

2.1 Γενικά περί σπινθηρισμών

Στο διάκενο του ατμοσφαιρικού αέρα υπάρχει ένας αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων που προήλθαν από φυσικούς τρόπους δηλαδή από ακτινοβολία υψηλής ενέργειας (πχ κοσμική , υπεριώδης) κυρίως από την κάθοδο αλλά και από το ίδιο το αέριο, δημιουργώντας ιονισμό. Όταν δεν επιβληθεί κάποιο ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο ο ιονισμός εξισορροπείται μέσω του απιονισμού. Σε περίπτωση όμως που επιβάλλεται υψηλή τάση αυξάνεται το ρεύμα αγωγιμότητας, προκαλείται διάσπαση του διηλεκτρικού υλικού και έτσι εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις.

Με τον όρο “σπινθηρισμοί” αποκαλούμε τις φωτεινές μερικές εκκενώσεις που συνοδεύονται με θόρυβο και λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής (150kV) και μέσης (20kV) τάσης. Με βάση τον τόπο εμφάνισής τους μπορούμε να διακρίνουμε δύο τύπους σπινθηρισμών:

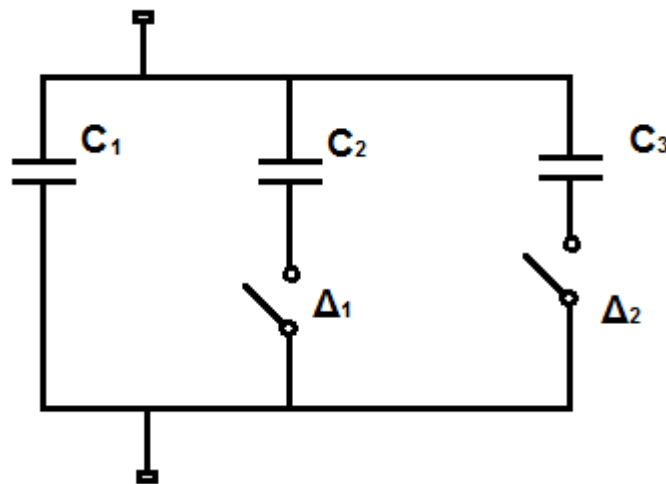
- Σπινθηρισμοί που παρατηρούνται λόγω διηλεκτρικών φαινομένων σε μονωτήρες και περί αγωγών.
- Σπινθηρισμοί που εκδηλώνονται σε στατικές ηλεκτρικές επαφές στις θέσεις σύνδεσης μεταξύ αγωγών, στις επαφές διακοπών εν λειτουργία και στις ασφαλειοθήκες.

Οι σπινθηρισμοί και οι μερικές εκκενώσεις εν γένει είναι επιζήμιες για ένα στερεό μονωτικό υλικό. Μπορούν να φθείρουν ανεπανόρθωτα την επιφάνειά του, υποβαθμίζοντας έτσι την διηλεκτρική του αντοχή. Οι συνέπειες αυτές μπορούν να χωριστούν σε θερμικές, διαβρωτικές και χημικές:

- Οι θερμικές συνέπειες εμφανίζονται λόγω της αύξησης θερμοκρασίας που παρατηρείται από την διέλευση των ρευμάτων κατά το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων.

- Οι διαβρωτικές συνέπειες παρατηρούνται λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας που προκαλεί διάβρωση του μονωτικού υλικού.
- Οι χημικές παρουσιάζονται από την οξείδωση της επιφάνειας του υλικού λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που εμφανίζονται.

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Η διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο χωρητικοτήτων και οι θέσεις ανομοιογένειας σαν ένα είδος διακόπτη. Με βάση την ισοδυναμία αυτή το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται παρακάτω [4,5].



Σχήμα 1.2.1-1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων

C_1 : ιδανική χωρητικότητα διάταξης

C_2 : χωρητικότητα όγκου υγιούς μονωτικού υλικού

C_3 : χωρητικότητα επιφάνειας υγιούς μονωτικού υλικού

Δ_1, Δ_2 : διακόπτες που όταν κλείνουν συμβολίζουν τη διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων

2.2 Σπινθηρισμοί σε μονωτήρες και αγωγούς

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης. Σπινθηρισμοί σε μονωτήρες ονομάζονται οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις, δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής στην επιφάνεια των μονωτήρων, που συνοδεύονται από θόρυβο.

Σπινθηρισμοί περί αγωγών αποκαλούνται οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις περί τους αγωγούς σε μορφή δαχτυλίου που συνοδεύονται με θόρυβο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Corona.

Οι εκκενώσεις αυτές αποτελούν λανθασμένα για πολλούς ένα επικίνδυνο φαινόμενο. Στην πραγματικότητα όμως πρόκειται απλά για ένα φαινόμενο εικόνας και ήχου που αποδίδονται κατά την εξαναγκασμένη συλλογή ελεύθερων ηλεκτρονίων από την άνοδο και όχι για επικίνδυνα πυρακτωμένα σωματίδια των αγωγών ή των μονωτήρων [4,5].

2.2.1 Σπινθηρισμοί επί μονωτήρων

Ο λόγος εμφάνισης των σπινθηρισμών επί μονωτήρων είναι η δημιουργία θέσεων διαταραχής στην επιφάνειά τους που προκαλούν οι ξένες επικαθίσεις και συγκεκριμένα η υγρασία και οι ρύποι διαφόρων ειδών. Η υγρασία επικάθεται στους μονωτήρες με τη μορφή δρόσου και συναντάται συνήθως σε παραθαλάσσιες περιοχές και όχι μόνο. Στους ρύπους εντάσσονται η καπναιθάλη, η σκόνη και οι καθαλατώσεις που συναντώνται κυρίως σε βιομηχανικές και παραθαλάσσιες περιοχές αντίστοιχα.

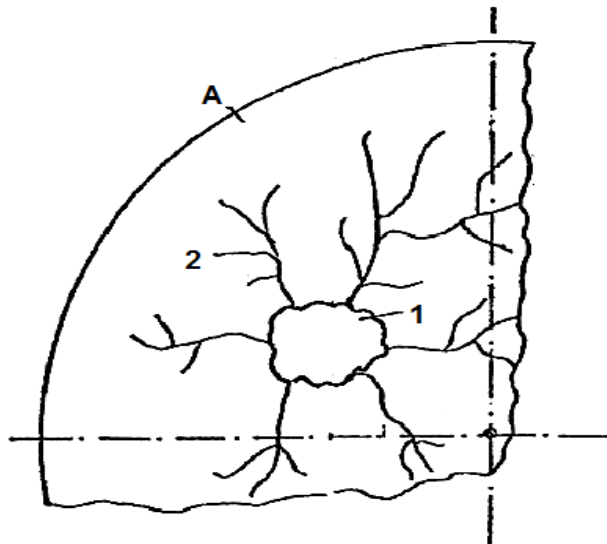
Σε περίπτωση αυξημένης υγρασίας και ρύπανσης οι μερικές αυτές εκκενώσεις εξελίσσονται σε έρπουσες διαρροές επί μονωτήρων, δηλαδή διαρροή επί μονωτήρα λόγω της ωμικής αντίστασης του συνδυασμού υγρασίας και ρύπανσης υπό μορφή δρόσου. Το φαινόμενο αυτό είναι πιθανό να προκαλέσει επιφανειακή διάσπαση (στην επιφάνεια του στερεού) ή υπερπήδηση (στο περιβάλλον μέσο του) με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των μέσων προστασίας της γραμμής, δηλαδή των ασφαλειών προστασίας ή του διακόπτη προστασίας. Σε μερικές περιπτώσεις διατεταγμένης προστασίας έχει παρατηρηθεί έως και εκδήλωση “black out” δηλαδή η εκτεταμένη διακοπή τάσης σε πολλές γραμμές.



Σχήμα 2.2.1-1: Φαινόμενο υπερπήδησης σε μονωτήρα

Στους μονωτήρες η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται με ακτινοβολία υπό τη μορφή δενδρίτη (σχήμα 1.2.1-1) δημιουργώντας μόνιμη παραμόρφωση της επιφάνειας του υλικού. Συγκεκριμένα η θερμική καταπόνηση που υφίσταται ο μονωτήρας κατά τις εκκενώσεις δημιουργεί κρατήρα και σπήλαια τα οποία είναι αποτέλεσμα τήξης του υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Σε περίπτωση που υπάρχουν θραύσματα, αυτά εντοπίζονται στην περιοχή του κρατήρα όπου πρόκειται να συμβεί η διάτρηση.

Παρακάτω παρατηρούμε το σχέδιο μιας επιφανειακής διάσπασης βιομηχανικού μονωτήρα.



Σχήμα 2.2.1-2: Φαινόμενο επιφανειακής διάσπασης σε βιομηχανικό μονωτήρα

A: Επιφάνεια στερεού μονωτικού υλικού

1: Κρατήρας

2: Σπήλαιο

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για την εμφάνιση σπινθηρισμών μετά έρπουσων μερικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης απαιτείται η συνύπαρξη αυξημένης υγρασίας και ρυπογόνου περιβάλλοντος. Έτσι τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται συχνότερα σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης συνήθως σε περιόδους παρατεταμένης ανομβρίας τους φθινοπωρινούς μήνες, πριν οι πρώτες βροχές ξεπλύνουν τον μονωτήρα, κατά τις μεταμεσονύκτιες και πρώτες πρωινές ώρες όπου υπάρχει έντονη υγρασία (παραθαλάσσιες περιοχές) και σε περιοχές με έντονη παρουσία ρύπων όπως οι βιομηχανικές περιοχές. Στις γραμμές χαμηλής τάσης δεν υφίσταται το φαινόμενο των σπινθηρισμών για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω.

Σε ένα απλοποιημένο μοντέλο για τους σπινθηρισμούς και τις έρπουσες εκκενώσεις, οι σπινθηρισμοί είναι η φωτεινή ακτινοβολία και ήχος και αποτελούν τις στεγνές ζώνες επί του μονωτήρα, ενώ οι έρπουσες εκκενώσεις είναι η διαρροή επί του μονωτήρα λόγω της ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει ο συνδισασμός “ρύπανση-υγρασία υπό μορφή δρόσου” και αποτελούν τις υγρές ζώνες [4,5].

2.2.2 Σπινθηρισμοί περί αγωγών – εκκενώσεις Corona

Εκκενώσεις Corona είναι το φαινόμενο που δημιουργείται σε ένα αέριο διάκενο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων διαφορετικής ακτίνας καμπυλότητας, όταν αυτά βρίσκονται υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού μερικών kV. Η εκκένωση Corona συνοδεύεται από την εμφάνιση ηλεκτρικών, οπτικών, ακουστικών, χημικών, αεροδυναμικών (ηλεκτρικός άνεμος) και ραδιοηλεκτρικών φαινομένων. Ο ηλεκτρικός άνεμος είναι ένα φαινόμενο το οποίο δημιουργείται από τη μετάδοση της ορμής των ιόντων στα ουδέτερα μόρια του αερίου οπότε παρατηρείται μία κίνηση του αερίου από το ηλεκτρόδιο με μικρή ακτίνα καμπυλότητας, προς το άλλο ηλεκτρόδιο.

Ο όρος στεμματοειδείς εκκενώσεις ή εκκενώσεις *Corona* είναι ταυτόσημος με την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων γύρω από τους αγωγούς των εναέριων γραμμών υψηλής και μέσης τάσης και οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στην παρουσία του συνδισασμού ρύπων-

υγρασίας. Για την εκδήλωση σπινθηρισμών μεταξύ αγωγών, και πολύ περισσότερο για τη διάσπαση μεταξύ αυτών, απαιτείται δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας και διηλεκτρικής αντοχής του αέρα από αγωγίμους ρύπους.

Όταν ένας αγωγός είναι τελείως καθαρός και λείος, τότε παρατηρεί κανείς ότι σε μια τιμή της τάσης (U_0), η οποία ονομάζεται τάση έναρξης, περιβάλλεται ο αγωγός από μια ομοιόμορφη φωτεινή αίγλη. Στην περίπτωση των ακάθαρτων και οξειδωμένων αγωγών διαπιστώνεται ότι σε κάποια τιμή $U < U_0$ εκδηλώνονται θύσανοι μήκους μερικών mm, ο αριθμός των οποίων είναι περιορισμένος ανά μονάδα επιφάνειας. Όταν στην συνέχεια αυξηθεί η τάση τότε εμφανίζεται η φωτεινή αίγλη που προαναφέρθηκε. Μια ερμηνεία για τη δημιουργία των θυσάνων μπορεί να δοθεί από τοπικές αυξήσεις της πεδιακής έντασης λόγω των προεξοχών στην επιφάνεια του αγωγού, οι οποίες προκαλούνται από τις οξειδώσεις και τις ακαθαρσίες. Ο περιορισμός του αριθμού των θυσάνων ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να αποδοθεί στη μείωση της πεδιακής έντασης στην περιοχή όπου εκδηλώνεται ένας θύσανος, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η εκδήλωση ενός άλλου πλησίον αυτού.

Η τάση λειτουργίας των εναέριων γραμμών είναι μικρότερη από την τιμή U_0 . Έτσι, οι στεμματοειδής εκκενώσεις εκδηλώνονται υπό μορφή θυσάνων. Οι εκκενώσεις αυτές και οι επιπτώσεις τους είναι σημαντικές στον τομέα υψηλής και μέσης τάσης καθώς το φαινόμενο αυτό προκαλεί σημαντικές απώλειες ενέργειας, παράσιτα και γήρανση των στερεών και υγρών μονωτικών υλικών. Επομένως κρίνεται αναγκαία η περεταίρω μελέτη του φαινομένου.

Μια εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής πεδιακής έντασης έναρξης του φαινομένου Corona είναι η παρακάτω :

$$E_{\alpha} = m_1 \times m_2 \times 30 \times \delta \times \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \times r}} \times \right)$$

(1.2.2-1)

όπου :

- **E_{α}** σε kV/cm
- **r** η ακτίνα του αγωγού σε mm
- **$m_1 = 0,98$ έως $0,83$** συντελεστής ανάλογ με την κατάσταση της επιφάνειας του αγωγού

- $m_2=1$ σε περίπτωση ξηρασίας έως $0,8$ σε περίπτωση υγρασίας
- δ σε $^{\circ}K/mbar$ συντελεστής για την πυκνότητα του αέρα ανάλογα με την πίεση p και την θερμοκρασία T :

$$\delta = \frac{p}{1013} \times \frac{293}{T} \quad (1.2.2-2)$$

Η πεδιακή ένταση E_1 μεταξύ δύο αγωγών δίνεται από τη σχέση :

$$E_1 = \frac{U}{n \cdot d} \quad (1.2.2-3)$$

όπου:

- d : απόσταση μεταξύ αγωγών
- n : συντελεστής χρησιμοποίησης του φορτίου

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης n εξαρτάται από την τιμή της γεωμετρικής σταθεράς p η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p = \frac{r+d}{r} \quad (1.3.2-4)$$

Εάν $p < 19,6$ τότε βρίσκουμε το n από τη σχέση $p=f(n)$.

Εάν $p > 19,6$ τότε υπολογίζουμε το n από τη σχέση:

$$n = \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(2 + \frac{d}{r}\right)}{d} \quad (1.2.2-$$

5)

Για να εκδηλωθούν σπινθηρισμοί πρέπει να ισχύει ότι $E_1 < E_a$. Σε διαφορετική περίπτωση είναι αδύνατη η εκδήλωση σπινθηρισμών [4,5]..

2.2.3 Φαινόμενο ιονισμού μεταξύ αγωγών μέσης τάσης

Για την αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας μεταξύ αγωγών μίας γραμμής MT (πχ 20kV) ή YT (πχ. 150kV) σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα εξετάζεται ακολούθως η ικανότητα μόνωσης για την δυσμενέστερη περίπτωση ηλεκτροδίων των πρακτικών εφαρμογών, που είναι η περίπτωση «ακίδα-πλάκα». Εξετάζοντας την περίπτωση αυτή καλύπτουμε ένα ευρύ φάσμα διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων με λιγότερο ανομοιογενές πεδίο όπως είναι η περίπτωση της διάταξης κύλινδρος-κύλινδρος. Έστω ότι σε έναν αγωγό υπάρχει μια προεξοχή (ακίδα) λόγω κάποιου είδους ρύπανσης και ο απέναντι αγωγός είναι καθαρός, οπότε θεωρείται ως «πλάκα». Για την απόσταση μόνωσης μίας τέτοιας διάταξης σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα υπό μέση ή υψηλή εναλλασσόμενη τάση ισχύει η σχέση:

$$d \geq (0,935 \div 0,99) \cdot \frac{U}{E_d}$$

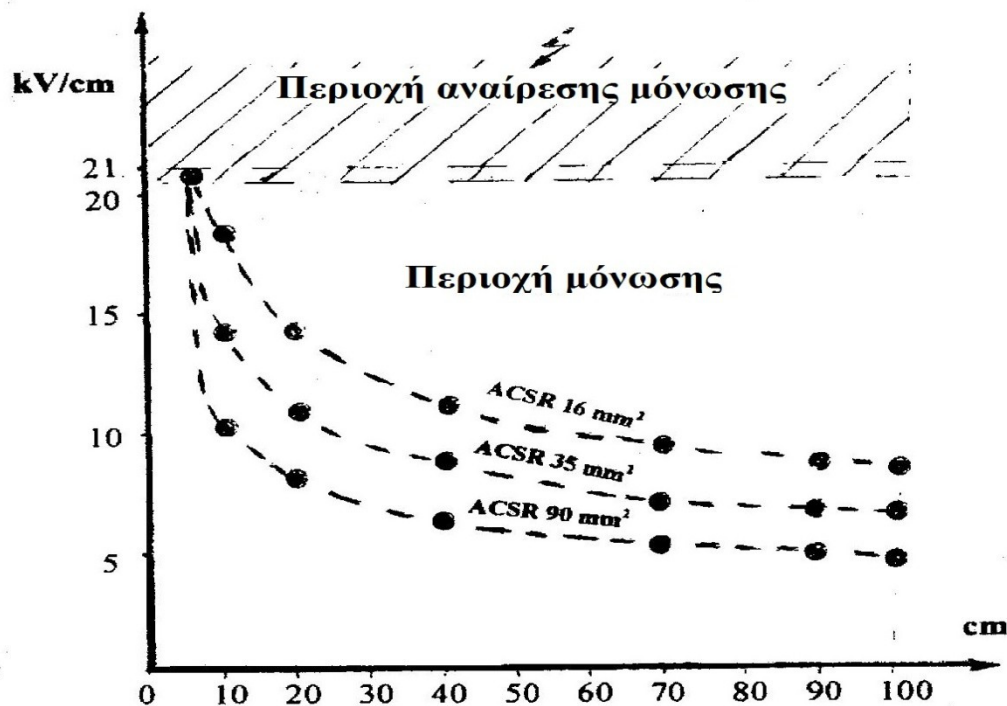
Όπου:

- U: ενεργός τιμή της τάσης
- E_d:ειδική πεδιακή ένταση για την οποία ισχύει ότι για d έως 150cm ισούται με E_d≈3,5kV/cm . Για d>150cm η τιμή της E_d σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα στα 200cm ισούται με E_d≈2,5kV/cm και στα 300cm ισούται με E_d≈3kV/cm.

Παρακάτω βλέπουμε τις κατάλληλες αποστάσεις μόνωσης και προστασίας για τις γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (Πίνακας 2.2.3-1) καθώς και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγών συναρτήσει των αποστάσεων μόνωσης (Σχήμα 2.2.3-1).

Γραμμή	Ελάχιστη απόσταση μόνωσης (d _{min})	Απόσταση προστασίας μεταξύ αγωγών σε γραμμές	Σύνηθες ύψος γραμμής από το έδαφος
MT 20kV	5,34 cm ~ 5,66 cm	85 cm ~ 125 cm	≈ 10
YT 150kV	40 cm ~ 42,4 cm	≈7,67 m	≈ 20

Πίνακας 2.2.3-1: Αποστάσεις μόνωσης και προστασίας σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης



Σχήμα 2.2.3-1: Τάξη μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αγωγών ACSR υπό εναλλασσόμενη τάση 20 kV ανάλογα με την απόσταση μόνωσης.

Για την εμφάνιση του φαινομένου ιονισμού μεταξύ εναέριων αγωγών μέσης τάσης είναι απαραίτητη η δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας του αέρα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της έντονης παρουσίας ρύπων και υγρασίας στην επιφάνεια των αγωγών. Στην μέση τάση (20kV), σε φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, για έναν αγωγό ACSR 95mm² ακτίνας $r=8,62\text{mm}$, $m_1=0.83$, $m_2=1$, $\delta=1\text{m}$ η πεδιακή ένταση έναρξης σπινθηρισμών σύμφωνα με τη σχέση (1.2.3.1) θα είναι:

$$E_a = m_1 \cdot m_2 \cdot 30 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) = 0,83 \cdot 1 \cdot 0,91 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{0,91 \cdot 8,62}}\right) = 25,09 \text{ kV/cm}$$

Για απόσταση $d=1\text{m}$ μεταξύ δύο αγωγών μέσης τάσης η γεωμετρική σταθερά p σύμφωνα με τη σχέση (1.3.2.4) ισούται με:

$$p = \frac{r+d}{r} = \frac{1000+8,62}{8,62} > 19,6$$

Συνεπώς ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου είναι ο εξής:

$$n = \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(2 + \frac{1000}{8.62}\right)}{1000} = 0.02$$

Και η πεδιακή ένταση του πεδίου για τάση 20kV σύμφωνα με την σχέση (1.3.2.3) θα είναι :

$$E_1 = \frac{U}{n \cdot d} = \frac{20}{0.02 \cdot 100} = 10 \text{ kV/cm}$$

Όπως παρατηρούμε $E_1 < E_a$ οπότε σε φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος αποκλείεται η εμφάνιση σπινθηρισμών. Για να συμβούν σπινθηρισμοί θα πρέπει να μειωθεί δραματικά η διηλεκτρική αντοχή του αέρα το οποίο συμβαίνει σε περιπτώσεις αυξημένης ρύπανσης και υγρασίας. Μια τέτοια περίπτωση είναι η παρουσία καπναιθάλης. Ο άνθρακας έχει ειδική αντίσταση $\rho \approx 3 \cdot 10^{-3} \Omega$ ενώ ο ατμοσφαιρικός αέρας $\rho = 1,3 \cdot 10^{16}$ έως $3,3 \cdot 10^{16} \Omega$. Έτσι οι επικαθίσεις του άνθρακα σε αγωγούς δημιουργεί αγωγίμους δρόμους στον αέρα με αποτέλεσμα την εκδήλωση σπινθηρισμών έως και διάσπαση.

Μια ικανοποιητική τιμή αντίστασης μόνωσης είναι $R = 1000 \Omega/V$, δηλαδή σε γραμμές μέσης τάσης 20kV πρέπει να έχουμε $R = 2 \cdot 10^7 \Omega$. Για παράδειγμα μια στήλη ατμοσφαιρικού αέρα διατομής 1 mm^2 μεταξύ δύο αγωγών που απέχουν απόσταση $L = 1 \text{ m}$ έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R_1 = \frac{\rho \cdot L}{A} = \frac{1,3 \cdot 10^{16} \cdot 1}{1 \cdot 10^{-3}} = 1,3 \cdot 10^{19} \Omega$$

Η τιμή αυτή είναι κατά πολύ παραπάνω από ικανοποιητική.

Εάν θεωρήσουμε ότι κατα το φαινόμενο των σπινθηρισμών η τιμή του ρεύματος I είναι μερικά mA (π.χ. 10mA) σε γραμμές μέσης τάσης, σε περίπτωση καπναιθάλης το μίγμα αέρα θα έχει αντίσταση:

$$R_2 = \frac{U}{I} = \frac{20000}{10 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^6 \Omega$$

Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την προαναφερθείσα ($R = 2 \cdot 10^7 \Omega$) οπότε παύει να έχει την κατάλληλη μονωτική ιδιότητα με αποτέλεσμα την

διάσπαση του μίγματος αέρα-καπναιθάλης και την εκδήλωση σπινθηρισμών [4,5].

2.2.4 Αδυναμία εμφάνισης σπινθηρισμών μεταξύ αγωγών χαμηλής τάσης

Στο εναέριο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (230V/400V) οι αγωγοί απέχουν $d=30\text{cm}$. Έστω ότι σε αυτούς τους αγωγούς έχουμε $p>19,6$ και $n=0,02$ για χάρην απλούστευσης. Συνεπώς η τιμή της έντασης έναρξης σπινθηρισμών παραμένει η ίδια με αυτή της μέσης τάσης, δηλαδή $E_a=25.09\text{kV/cm}$. Η ένταση E_1 του πεδίου για τάση $U=400\text{V}$ είναι η εξής:

$$E_1 = \frac{U}{n \cdot d} = \frac{0.4}{0.02 \cdot 30} = 0,667 \text{ kV/cm}$$

Παρατηρούμε ότι $E_1 \ll E_a$ οπότε συμπεραίνουμε ότι η εμφάνιση σπινθηρισμών στους αγωγούς χαμηλής τάσης είναι αδύνατη [4].

3. Επικαθίσεις σε μονωτήρες και αγωγούς

3.1 Επικαθίσεις σε μονωτήρες και αγωγούς

Οι διαφορών ειδών επικαθίσεις στην επιφάνεια των μονωτήρων και των αγωγών μπορούν να προκαλέσουν, ανάλογα με το βαθμό τους, μερικές εκκενώσεις, επιφανειακή διάσπαση και σε προχωρημένο επίπεδο έως και υπερπήδηση. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνδυασμός ρύπανσης και υγρασίας υπό μορφή δρόσου και η δημιουργία τους προκαλεί δραματική μείωση της μόνωσης του μονωτήρα από 40% έως και 80% , με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [6,7,8].

3.1.1 Ρύπανση

Με τον όρο ρύπανση εννοούμε τις επικαθίσεις ακαθαρσιών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα πάνω στην επιφάνεια των μονωτήρων και των γραμμών μεταφοράς με αποτέλεσμα την μείωση της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών υλικών. Οι επικαθίσεις αυτές διαχωρίζονται ανάλογα με την προέλευσή τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες, την θαλάσσια και την βιομηχανική ρύπανση:

- Θαλάσσια ρύπανση: Υφίσταται σε παραθαλάσσιες περιοχές λόγω της έντονης παρουσίας θαλάσσιας άλμης. Οι άνεμοι μεταφέρουν σταγονίδια θαλάσσιου νερού το οποίο επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων δημιουργώντας ένα λεπτό αγωγίμο αλατούχο επίστρωμα.
- Βιομηχανική ρύπανση: Εμφανίζεται σε βιομηχανικές περιοχές και αποτελείται από στερεά κατάλοιπα που παράγουν οι βιομηχανίες και αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.

Η ρύπανση αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης της επιφανειακής αγωγιμότητας και εμφανίζεται τόσο σε γραμμές μεταφοράς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όσο και σε υποσταθμούς. Παρότι οι γραμμές μεταφοράς είναι λόγω τοποθεσίας πιο εκτεθειμένες σε ρύπους και σε ποικίλες ατμοσφαιρικές συνθήκες, το σφάλμα που μπορεί να προκληθεί σε έναν υποσταθμό είναι πολύ πιο σοβαρό από ένα σφάλμα στις γραμμές. Οι υποσταθμοί είναι κομβικά σημεία που εμπερέχουν τους μονωτήρες. Σε περίπτωση βλάβης ενός μονωτήρα το κόστος είναι σαφώς μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό στις γραμμές. Για τον λόγο αυτό θα ασχοληθούμε κυρίως με τη ρύπανση επί μονωτήρων.

Όπως προαναφέραμε η ρύπανση είναι ένας από τους δύο σημαντικότερους λόγους δημιουργίας σπινθηρισμών σε αγωγούς και μονωτήρες. Σε περίπτωση που οι μονωτήρες βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο και σε ρυπογόνο περιβάλλον η μονωτική ικανότητα των μονωτικών τους υλικών μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Μετά από κάποιο επίπεδο ρύπανσης η μονωτική ικανότητά τους παύει να υφίσταται με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον ασφαλής η λειτουργία τους και να υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης σπινθηρισμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ρύπανση επηρεάζει περισσότερο την αντοχή των μονωτήρων υπό εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση, παρά υπό κρουστική.

Πέρα όμως από την εκδήλωση μερικών ηλεκτρικών εκκενώσεων η ρύπανση προκαλεί και άλλες επιπτώσεις. Μια εξ' αυτών είναι η διάβρωση του μονωτήρα η οποία αποτελεί μια μη αναστρέψιμη υποβάθμισή του και έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια υλικού από την επιφάνειά του και κατ'επέκταση την μείωση της μηχανικής αντοχής του. Επίσης υπάρχει περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ξύλινη υποδομή (ξύλινοι πάσσαλοι) στα σημεία επαφής των μεταλλικών τμημάτων με το ξύλο. Τέλος, υπάρχει το ενδεχόμενο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές συχνότητες κοντά στην εγκατάσταση.

3.1.2 Υγρασία

Η ύπαρξη έντονης υγρασίας είναι ο δεύτερος λόγος δημιουργίας μερικών εκκενώσεων στους μονωτήρες του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η υγρασία μπορεί να εκδηλωθεί ως δροσιά, ομίχλη ή σιγανή βροχή και να επικαθίσει στην επιφάνεια των μονωτήρων υπό τη μορφή δρόσου δημιουργώντας έτσι έναν αγωγίμο δρόμο ανάμεσα σε δύο σημεία του μονωτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μονωτικής ικανότητας των υλικών της επιφάνειάς του.

3.1.3 Συνδυασμός ρύπανσης και υγρασίας

Ο συνδυασμός αυξημένης ρύπανσης και υγρασίας αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα για τις μονωτικές ιδιότητες των μονωτήρων. Μπορεί να προκαλέσει δραματική μείωση της μόνωσης των μονωτικών

υλικών τους από 40% έως και 80%, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου.

Μια λύση για τη μείωση των αστοχιών είναι η αύξηση του μήκους ερπυσμού, δηλαδή του μήκους της ημιπεριμέτρου της εγκάρσιας διατομής, με τη δημιουργία πτυχώσεων με χαρακτηριστική κλίση στο πάνω μέρος της επιφάνειας του μονωτήρα. Αυτή η μορφή διευκολύνει και τον αυτοκαθαρισμό της επιφάνειάς τους.

Στην προσπάθεια των ειδικών να βρεθεί ένα μέτρο επικινδυνότητας εκδήλωσης σπινθηρισμών στις διάφορες περιοχές ώστε να λαμβάνονται τα αντίστοιχα μέτρα ασφαλείας, δημιουργήθηκε το πρότυπο IEC 815/1986, το οποίο αποτελεί μία κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό έχουμε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Επίπεδο ρύπανσης	Περιβάλλον	Ελάχιστο μήκος ερπησμού
Ελαφριά ρύπανση (0.006 mg/cm ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές χωρίς βιομηχανική δραστηριότητα, με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης • Περιοχές με μικρή βιομηχανική δραστηριότητα και μικρή πυκνότητα κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους ή βροχοπτώσεις • Αγροτικές περιοχές • Ορεινές περιοχές <p><u>Σημείωση:</u> Οι προαναφερθείσες περιοχές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10χλμ έως 20χλμ από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους που έρχονται από τη θάλασσα</p>	16mm/kV
Μεσαία ρύπανση (0.20 mg/cm ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές με βιομηχανίες που δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης • Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένη σε ισχυρούς ανέμους ή βροχοπτώσεις • Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από την θάλασσα, αλλά σε απόσταση τουλάχιστον μερικών χιλιομέτρων από την ακτή (ανάλογα την μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου) 	20mm/kV

<p>Βαριά ρύπανση (0.60 mg/cm²)</p>	<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 ή βροχοπτώσεις 	<p>25mm/kV</p>
<p>Πολύ βαριά ρύπανση (άνω των 0.006 mg/cm²)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές περιορισμένης έκτασης, εκτεθειμένες σε αγωγίμη σκόνη και σε βιομηχανικό καπνό που προκαλεί αγωγίμες επικαθίσεις σημαντικού πάχους • Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και κτείνονται σε ψεκασμό θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο άνεμο από τη θάλασσα • Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλα χρονικά διαστήματα, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπύκνωση 	<p>31mm/kV</p>

Συνεπώς, η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαλλοντική ρύπανση, καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτές, με αποτέλεσμα να χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι υπό συνθήκες έντονης ρύπανσης οι μονωτήρες εμφανίζουν, ακόμη και υπό την τάση κανονικής λειτουργίας τους, εκκενώσεις ορατές σε ορισμένη απόσταση κατά τη νύκτα και συνοδευόμενες από χαρακτηριστικό τρίξιμο.

Η έντονη ρύπανση μπορεί να μειώσει την τάση υπερπήδησης του μονωτήρα, οδηγώντας έτσι σε μη προγραμματισμένες βλάβες και μειωμένη αξιοπιστία. Η υπερπήδηση σε έναν μονωτήρα εξαιτίας της ρύπανσης είναι μία περίπλοκη διαδικασία η οποία περνά από διάφορα στάδια. Αυτά ονομαστικά είναι τα εξής:

1. Η δημιουργία στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα
2. Ο σχηματισμός ξηρών ζωνών
3. Οι μερικές εκκενώσεις
4. Η υπερπήδηση

Αν κάποιο από τα προηγούμενα στάδια δεν πραγματοποιηθεί, το φαινόμενο της υπερπήδησης δεν είναι δυνατόν να εκδηλωθεί [6,7,8].

3.2 Υλικά μονωτήρων

Όλοι οι μονωτήρες πρέπει να καλύπτουν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις. Η αξιοπιστία είναι η σημαντικότερη ιδιότητα ενός μονωτήρα. Η μεγαλύτερη αστοχία σε έναν μονωτήρα γραμμής συμβαίνει, όταν αυτός σπάσει μηχανικά και κοπεί η γραμμή. Ωστόσο, ακόμα κι αν συμβεί αυτό, οι μονωτήρες στους γειτονικούς πυλώνες θα πρέπει να μπορούν, όχι μόνο να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο, αλλά και να αντέξουν τη μηχανική καταπόνηση που σχετίζεται με ένα τέτοιο γεγονός, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα αποκατάστασης και το κόστος. Για αυτό είναι απαραίτητη η μελέτη του υλικού του μονωτήρα που θα χρησιμοποιηθεί.

Τα τρία βασικά μέρη ενός μονωτήρα είναι το διηλεκτρικό, οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο, λιπαντικά ή βαφές. Η επιλογή του διηλεκτρικού υλικού είναι σημαντική και εξαρτάται από της ανάγκες που έχει κάθε μονωτήρας ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο θα τοποθετηθεί.

Τα διηλεκτρικά είναι κυρίως κεραμικά (πορσελάνη, γυαλί), ή πολυμερή. Τα υλικά αυτά απαιτείται να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσουν. Πρέπει επίσης να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων, που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου, χωρίς να διασπώνται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι πρακτικά πάντα ηλεκτρικά αγωγίμες εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθίσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Στην περίπτωση των κεραμικών διηλεκτρικών, το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο είναι το πυρίτιο, ενώ στην περίπτωση των πολυμερών, ο άνθρακας. Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών [9,10].

3.2.1 Κεραμικοί μονωτήρες

Η πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα (άμορφη δομή) που περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφορετικών ειδών και κόκκους από τα αρχικά συστατικά των ορυκτών, ορισμένα από τα οποία έχουν διαλυθεί μερικώς.



Σχήμα 3.2.1-1: Μονωτήρες πορσελάνης

Το γυαλί, στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής χωρίς προσμίξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως πάντα περιέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό, τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι πρώτες ύλες των μονωτήρων σκληρυμένου γυαλιού είναι το πυρίτιο (περίπου 57%), ο ασβεστόλιθος (9%) και το άνυδρο ανθρακικό νάτριο (14%). Η μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη επιτρέπει την χρήση λεπτών δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων (Σχήμα 3.2.1-2). Από την άλλη, οι μονωτήρες πορσελάνης είναι πάντα άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μονωτήρων γυαλιού είναι η ιδιότητά τους να αποθηκεύουν σημαντικό ποσό ενέργειας όταν υπόκεινται σε μηχανικές καταπονήσεις. Κατα την έντονη μηχανική κρούση ή έπειτα από ολική διάβρωση ενός στρώματος η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται διασπώντας το τεμάχιο σε μικροσκοπικά κυβικά θραύσματα το οποία εκτοξεύονται σφοδρά. Για τον λόγο αυτό δεν είναι κατάλληλη η χρήση τους σε κατοικημένες περιοχές.



Σχήμα 3.2.1-2: Μονωτήρες γυαλιού

3.2.2 Πολυμερείς μονωτήρες

Η χρήση των κεραμικών μονωτήρων (από πορσελάνι ή γυαλί) ήταν ήταν ευρύτερη λόγω της μακρόχρονης πείρας των ειδικών πάνω στις ιδιότητες των υλικών αυτών. Όμως το μεγάλο βάρος τους, η δυσκολία κατασκευής τους και η ευθραυστότητά τους οδήγησαν στην αναζήτηση ενός υλικού πιο ανθεκτικού και με καλύτερες ιδιότητες. Για αυτό η αντικατάστασή τους από πολυμερείς μονωτήρες δεν άργησε πολύ, αφού αποτελούν πλέον μια καλή και συμφέρουσα οικονομικά επιλογή. Το νέο υλικό αυτό κατασκευάζεται με ευκολία και έχει μεγάλη ποικιλία στην επιλογή των ιδιοτήτων τους, όπως για παράδειγμα σχεδιάζονται μονωτήρες που αντέχουν στο φως, στις μεταβολές θερμοκρασίας και καποιοι που απωθούν το νερό. Η διάδοση της χρήσης τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη βαθύτερης μελέτης και κατανόησης των ιδιοτήτων τους.

Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλαμβανόμενο βασικό είδος μορίων και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά, σπάνια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων.

Ιδιαίτερα διαδεδομένη κατηγορία πολυμερών είναι οι θερμοπλαστικές εποξειδικές ρητίνες, οι οποίες είναι αρκετά οικονομικές. Το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε αλλοιώσεις της χημικής τους

σύστασης υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, τις καθιστά καταλληλότερες για εσωτερικούς χώρους. Αντιθέτως, μια άλλη ποιότητα πλαστικού, οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες, έχουν μεγάλη αντοχή στην φωτόλυση.

Μία ακόμα σημαντική κατηγορία συνθετικών μονωτικών είναι οι ελαστομερείς ρητίνες σιλικόνης, οι οποίες αντέχουν στην καύση και δεν υπόκεινται σε μόνιμες βλάβες σε περίπτωση ερπυσμού και μερικών εκκενώσεων όπως οι οργανικές ρητίνες. Αυτή η ιδιότητά τους οφείλεται στον σκελετό από πυρίτιο από τον οποίο αποτελούνται και στο γεγονός ότι περιέχουν λίγο άνθρακα στη χημική τους σύσταση.

Η χρήση τους είναι ευρεία για την ανάρτηση και στήριξη των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες αποτελούνται από μεγάλες δέσμες αγωγών για να περιορίσουν τις ηλεκτρικές απώλειες. Στην περίπτωση αυτή το μηχανικό φορτίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το όριο που αντέχουν οι συνήθεις μονωτήρες γυαλιού ή πορσελάνης [9,10].



Σχήμα 3.2.2-1: Πολυμερείς μονωτήρες

3.2.3 Σύγκριση κεραμικών και πολυμερών μονωτήρων

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ πολυμερών και κεραμικών υλικών βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου - οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα.

Η ύπαρξη ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια των κεραμικών μονωτήρων, συμβάλλει στην αύξηση της

ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή τη δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμίξεων, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα. Αντίθετα, οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση.

Ως βασικότερο μειονέκτημα της πορσελάνης θα μπορούσε να καταγραφεί η δυσκολία και το υψηλό κόστος βιομηχανικής παρασκευής της σε συμπαγή τεμάχια, με πάχος μεγαλύτερο από 20mm. Αυτός είναι και ο λόγος, που οι μονωτήρες πορσελάνης μέσης και υψηλής τάσης κατασκευάζονται συνήθως από περισσότερα τεμάχια που συγκολλούνται με τσιμέντο. Τέλος, ένα ακόμα σοβαρό μειονέκτημα της πορσελάνης, είναι ότι μπορεί να υποστεί διάτρηση εσωτερικά χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη και έτσι ο βαθμός της ενδεχόμενης βλάβης δεν είναι γνωστός, μέχρι να επέλθει ολική συντριβή του δοκιμίου.

Η βελτιωμένη μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη, επιτρέπει τη χρησιμοποίηση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων. Με τον τρόπο αυτόν, αυξάνεται σημαντικά το μήκος του ερπυσμού, ενώ η ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό μέχρι και 40%.

Αξίζει να τονισθεί, πως το εύρος της βιομηχανικής εφαρμογής του μονωτήρα από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένο από εκείνο του μονωτήρα πορσελάνης. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, περιορίζεται στους μονωτήρες τύπου «cap and pin» ή σε εκείνους τους τύπους, όπως είναι οι μονωτικοί στύλοι στήριξης των σιδηροδρομικών δικτύων και οι στύλοι πολλαπλών κώνων, που αποτελούνται από διακριτές διατάξεις δισκοειδούς μορφής.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές της ελεύθερης επιφανειακής τους ενέργειας. Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου, που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίστανται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση περισσότερο απ' ό,τι τα κεραμικά υλικά. Όταν λοιπόν λαμβάνεται υπ' όψιν και η αντοχή στις διασπάσεις λόγω ρύπανσης, οι μονωτήρες με ελαστομερή προστατευτικά καλύμματα σιλικόνης (silicon rubber housing) αποδεικνύεται ότι υπερτερούν έναντι των παραδοσιακών μονωτήρων από πορσελάνη και γυαλί. Με άλλα λόγια, τα πολυμερή υλικά φαίνεται να

είναι ιδανικά για εξωτερικούς μονωτήρες. Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι συχνά τέτοιες που οδηγούν στη διάβρωση της επιφάνειας του πολυμερούς. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην απώλεια των άριστων επιφανειακών ιδιοτήτων. Οι διαβρωτικές διαδικασίες συμβάλλουν σε μια μη αναστρέψιμη και χρονικά εξαρτώμενη φθορά.

Όλα τα πολυμερή αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, ενώ επίσης υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών τους δεσμών από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανό να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς, οι οποίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά ο μονωτήρας καταστρέφεται.

Η αντίσταση στην περιβαλλοντική φθορά μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υλικών που προστατεύουν από τη θερμοκρασία, όπως είναι το ATH (Aluminum Tri Hydrate) ή αντιοξειδωτικών. Στους μονωτήρες υψηλών τάσεων ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιούμε ATH, είναι η ιδιότητά του να μειώνει την επιφανειακή θερμοκρασία στις περιπτώσεις εμφάνισης τόξου, μέσω της διάσπασής του σε οξείδιο του αλουμινίου και νερό που ακολουθείται από εξάτμιση του νερού.

Όσον αφορά στους κεραμικούς μονωτήρες, είναι αναγκαίο να γίνει εκμετάλλευση των καλών ιδιοτήτων τους, αλλά με ταυτόχρονη μείωση της επιφανειακής υγροσκοπικότητάς τους και της ανεπιθύμητης έλξης ρύπων.

3.2.4 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών υλικών

Διάφορα κεραμικά και πολυμερή υλικά είναι τα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονωτήρων. Κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες πρέπει να μελετηθούν πριν γίνει η τελική επιλογή για κάποιον μονωτήρα. Εκτός από την ικανότητα να δέχονται

μεγάλη τάση χωρίς να παρουσιάζουν αστοχίες, κάθε υλικό έχει ξεχωριστές μηχανικές ιδιότητες που το κατατάσσουν αυτόματα σε μια από τις κατηγορίες ανάρτησης, στήριξης ή διέλευσης ενός ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες των δημοφιλέστερων μονωτικών διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των μονωτήρων φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 3.2.4-1) [3,10].

Ιδιότητα	Μονάδα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρυνμέν ο γυαλί	Πολυμερές	RBGF
Πυκνότητα	g/cm	2.3 - 3.9	2.5	0.9 - 2.5	2.1 - 2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό	Mpa lb/in ² (x10 ³)	30 - 100 4.0 - 14.0	100 - 120 14.5 - 17.4	20 - 35 3.0 - 13	1300 - 1600 190 - 230
Αντοχή σε θλίψη	Mpa lb/in ² (x10 ³)	240 - 820 34 - 120	210 - 300 30 - 40	80 - 170 11 - 24	700 - 750 100 - 107
Συντελεστής εφελκυσμού	Gpa lb/in ² (x10 ³)	50 - 100 7 - 14	7.2 10.1	0.6 - 16 0.1 - 2	43 - 60 6.0 - 8.0
Θερμική αγωγιμότητα	W/m °K	1 - 4	1.0	0.17 - 0.9	0.2 - 1.2
Διασταλτικότητα (20-100 °C)	(x10 ⁻⁶)/°K	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)	(x10 ⁻³)	20 - 40	15 - 50	0.1 - 5.0	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

Πίνακας 3.2.4-1: Μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μονωτικών υλικών

3.3 Τρόποι αποφυγής εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων σε μονωτήρες

Όπως προαναφέραμε οι αστοχίες των μονωτήρων, δηλαδή η προσωρινή ή μόνιμη απώλεια της μονωτικής τους ικανότητας, όπως είναι η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την ασφάλεια του δικτύου και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Το ποσοστό της εμφάνισής τους κυμαίνεται από 0,1 έως 1% ετησίως και μπορεί να προκαλέσει βλάβες στον εξοπλισμό και στη λειτουργία των δικτύων

διανομής έως και διακοπή της λειτουργίας ενός μέρος του δικτύου. Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η περεταίρω μελέτη για την αποφυγή των αστοχιών στους μονωτήρες.

Είναι γνωστό ότι τόσο το υλικό, όσο και το γεωμετρικό σχέδιο των μονωτήρων, παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο για τις μονωτικές τους επιδόσεις, καθώς επηρεάζει τον αυτοκαθαρισμό τους (από τη βροχή), τα μονοπάτια διαρροής, αλλά και την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Ανάλογα με το υλικό του μονωτήρα υπάρχουν πρόσθετα μέτρα προστασίας του που λαμβάνονται για την αποφυγή της εκδήλωσης σπινθηρισμών, διάσπασης και υπερπήδησης.

Για τους μονωτήρες πορσελάνης ένα επιπρόσθετο μέτρο που εφαρμόζεται είναι η επέκταση του μήκους του μονωτήρα με προσθήκη πολυμερών δίσκων πάνω από τους πορσελάνινους προκειμένου να αυξηθεί το μήκος ερπησμού.

Η χρήση μονωτήρων με ειδικό σχήμα το οποίο δυσκολεύει την εναπόθεση ρύπων στην επιφάνειά του είναι ένας καλός αλλά κοστοβόρος τρόπος αντιμετώπισης των ρύπων.

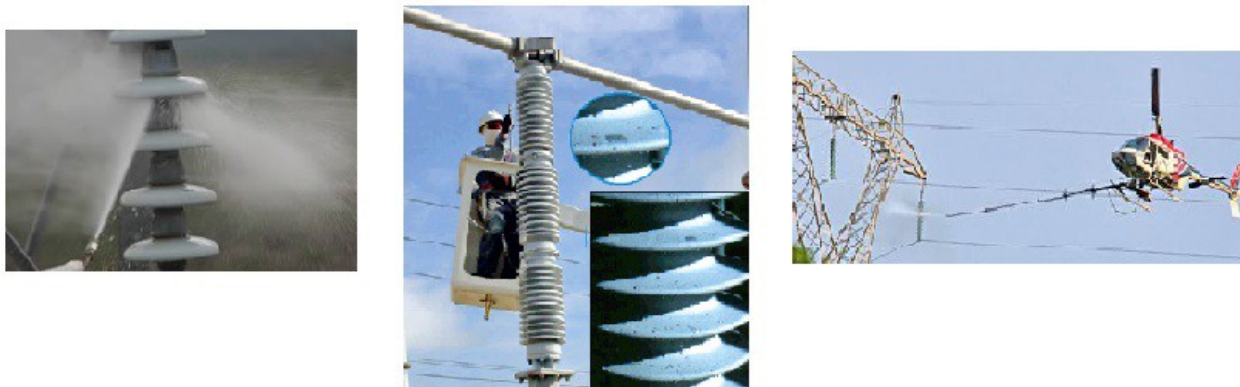
Ένα άλλο μέτρο είναι η προγραμματισμένη πλύση των μονωτήρων με υπο πίεση νερό (σχήμα 3.3-1) για την απομάκρυνση τυχόν ρύπων από την επιφάνειά του ή με βολή κόκκων δημητριακών και CO₂ αλλά είναι πιο κοστοβόρο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ανά 6, 12 ή 24 μήνες ανάλογα τις συνθήκες και την περιοχή που είναι εγκατεστημένος. Παρότι είναι αρκετά αποτελεσματικό το μέτρο αυτό, είναι χρονοβόρο και απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό γι' αυτό και δεν προτιμάται.

Στους πορσελάνινους μονωτήρες συχνά χρησιμοποιείται πολυμερής επίστρωση για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους υπό συνθήκες ρύπανσης. Η χρήση βουλκανοζόμενης σιλικόνης σε θερμοκρασία δωματίου (Room Temperature Vulcanized) εφαρμόζεται όλο και περισσότερο σε μονωτήρες γραμμών και υποσταθμών. Το επίστρωμα δημιουργεί υδροφοβικότητα απομακρύνοντας την υγρασία που τυχόν υπάρχει στην επιφάνειά του. Η προσθήκη του υλικού γίνεται σε μορφή διαλύματος το οποίο στερεοποιείται σταδιακά σε θερμοκρασία δωματίου, με αποτέλεσμα την εύκολη επικάλυψη σύνθετου γεωμετρικού σχήματος μονωτήρων. Εφαρμόζεται σε υπάρχοντες μονωτήρες μετά από κατάλληλο καθαρισμό. Βάσει μετρήσεων έχει επιβεβαιωθεί η χρησιμότητά τους καθώς και η μεγάλη τους διάκεια η οποία ποικίλει ανάλογα με το πάχος της επικάλυψης και το ποσοστό ρύπανσης.

Η επάληψη με γράσο ή άλλους λιπαρούς υδρογονάνθρακες οι οποίοι παράγουν υδρόφοβες επιφάνειες είναι εξίσου αποτελεσματική. Η διάρκεια της επίστρωσης είναι ανάλογη με την ποιότητα του επιστρώματος, την εφαρμογή του και τις τοπικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Είναι μια διαδικασία που απαιτεί συντήρηση και επανάληψη ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την οποία το παλιό στρώμα αφαιρείται και τοποθετείται το νέο χειρονακτικά. Είναι αργή και απαιτεί την προσωρινή διακοπή της ηλεκτροδότησης.

Ένα είδος ειδικής επίστρωσης είναι και η υάλωση. Η αγωγή ή ημιαγωγή υάλωση διατηρεί ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας του μονωτήρα προστατευμένο από την υγρασία του περιβάλλοντος. Η μέθοδος όμως αυτή επιτρέπει την διαρκή διέλευση ρευμάτων διαρροής με αποτέλεσμα να έχει υψηλές απώλειες ισχύος και έκλυση μεγάλης ποσότητας θερμότητας. Επίσης η φθορά της υάλωσης είναι ένας ακόμα ανασταλτικός παράγωντας.

Για τους πολυμερείς μονωτήρες σπάνια χρησιμοποιείται καποιο πρόσθετο μέτρο αποφυγής εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων. Οι συνθετικοί μονωτήρες είναι πολύ δύσκολο να προσβληθούν από συνήθεις ηλεκτρικές βλάβες και επιδράσεις χειρισμού, ενώ μπορούν να αντέξουν μηχανικό φορτίο που υπερβαίνει τους 100 τόνους [10].



Σχήμα 3.3-1: Καθαρισμός μονωτήρων με υπο πίεση νερό για απομάκρυνση ρύπων

3.4 Αρχές σχεδίασης μονωτήρων

Η ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας του μονωτήρα (δηλαδή η αποφυγή της δημιουργίας τόξων σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας) όπως προαναφέραμε καθορίζεται από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και

δευτερευόντως από τη θέση λειτουργίας του μονωτήρα (κατακορύφως, κεκλιμένα ή οριζοντίως) καθώς και τις ιδιότητες της επιφάνειάς του, όπως η υδροφοβικότητα και η τραχύτητα.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω μπορούμε συγκεντρωτικά να αναφέρουμε τις αρχές που πρέπει να ακολουθούνται κατά την σχεδίαση και κατασκευή μονωτήρων:

- *Μεγιστοποίηση μήκους ερπησμού*: Γενικά η αντοχή των μονωτήρων υπό βροχή είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή σε συνθήκες ξηρασίας. Θα ήταν ακόμα μικρότερη αν οι μονωτήρες δεν είχαν τη χαρακτηριστική κυματοειδή μορφή της κάτω επιφάνειάς τους, που εξασφαλίζει πως ένα μέρος της επιφάνειας παραμένει αδιάβρεκτο, ενώ παράλληλα διακόπτεται η συνέχεια του αγωγίμου στρώματος ύδατος. Εκτός αυτού η κυμάτωση βοηθά στην αύξηση του μήκους ερπησμού, διαδρομή που ακολουθούν οι έρπουσες εκκενώσεις. Η μεγιστοποίηση του μήκους αυτού πρέπει να γίνεται σχεδιαστικά χωρίς να καταστρέφεται η αεροδυναμική της επιφάνειας η οποία βοηθά στην αποφυγή της εναπόθεσης αιρούμενων κόκκων και σταγονιδίων πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα από τον άνεμο.
- *Υποβοήθηση αφύγρυνσης επιφανειών*: Μπορεί να επιτευχθεί με την αποφυγή οριζόντιων και επίπεδων επιφανειών.
- *Διατήρηση ταχύτητας ανέμου κοντά στο μονωτικό*: Είναι απαραίτητα προϋπόθεση καθώς η ενδεχόμενη κατά τη σχεδίαση δημιουργία περιοχών στροβιλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την εναπόθεση ρύπων στα ελικοειδή τμήματα της επιφάνειας.
- *Αύξηση επιφανειακής αντίστασης*: Η ομοιόμορφη διάσπαση των στρωμάτων υγρασίας σε μορφή μεμονωμένων σταγόνων μπορεί να εξασφαλιστεί με κατάλληλη σχεδίαση και επεξεργασία του μονωτικού υλικού. Με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα μπορούν να μειωθούν αισθητά.

Οι σχεδιαστικές αρχές που παραθέσαμε παραπάνω δεν είναι αρκετές για την κατασκευή του «ιδανικού σχήματος» μονωτήρα αφού η απόδοσή του εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα της επιφάνειάς του σε υγρασία. Οι συνέπειες της αρχής της εξάρτησης του ιδανικού σχήματος του μονωτήρα από το ποσοστό της υγρασίας είναι ευρείες και

επεκτείνονται μέχρι την εγκυρότητα των τεχνικών δοκιμών και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αντιμετώπισης της επιφανειακής διάσπασης [10,11].

4. Ηλεκτρικοί σύνδεσμοι

4.1 Γενικά περί ηλεκτρικών συνδέσεων

Ο όρος ηλεκτικός σύνδεσμος ή ηλεκτρική επαφή αναφέρεται στη σύνδεση μεταξύ δυο ρευματοφόρων αγωγών μίας ηλεκτρικής εγκατάστασης. Τα τμήματα που συνδέονται ονομάζονται τμήματα επαφή ή απλά επαφές, το τμήμα που συνδέεται με το θετικό οπλισμό της πηγής ονομάζεται άνοδος και το άλλο κάθοδος. Η δύναμη που συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής ονομάζεται δύναμη σύσφιξης F .

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι είναι αναπόσπαστο κομμάτι των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, όπως οι ηλεκτρολογικοί πίνακες και κυκλώματα γειώσεων. Η αξιόπιστη λειτουργία τους είναι απαραίτητη για την ασφάλεια της εγκατάστασης.

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- *Μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι:* συνδέουν δύο μέρη της εγκατάστασης σταθερά μέσω κοχλιών. Τέτοιοι σύνδεσμοι είναι οι συνδέσεις των ακροδεκτών των καλωδίων, οι συνδέσεις μεταξύ των ζυγών καθώς και οι συνδέσεις στα κυκλώματα γείωσης.
- *Ανόμενοι σύνδεσμοι:* μπορούν να συνδέουν και να αποσυνδέουν μέρος της εγκατάστασης μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επαφές των διακοπών και των ασφαλειοαποζευκτών.

Μία ακόμα κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών επαφών αφορά στην ύπαρξη ή μη της ισχύος διακοπής και αποτελείται από παρακάτω δύο κατηγορίες:

- *Στατικές ηλεκτρικές επαφές:* δεν έχουν ισχύ διακοπής και μπορεί κανείς να τις χειριστεί μόνο εφόσον το κύκλωμα τεθεί εκτός τάσης. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διακόπτη φορτίου ή ισχύος ανάλογα με την τάση. Έχουν ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις σαν αποζεύκτες, γειωτές και ασφαλειοθήκες.
- *Ηλεκτρικές επαφές με ισχύ διακοπής:* έχουν τη δυνατότητα διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να επηρεάζεται από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε διεξοδικά τις στατικές ηλεκτρικές επαφές και τα φαινόμενα που εκδηλώνονται σε αυτές κατά τη λειτουργία τους υπό διάφορες συνθήκες [12].

4.1.1 Δύναμη σύσφιξης στις στατικές ηλεκτρικές επαφές

Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές ορίζονται ως η λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών. Κατασκευάζονται συνήθως από μέταλλα τα οποία έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η σκληρότητα των μετάλλων αυτών δεν είναι μεγάλη με αποτέλεσμα όταν βρίσκονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης να παραμορφώνονται ελαστικά ή πλαστικά στο σημείο εκείνο. Έτσι δημιουργούνται περιοχές με φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς να σημαίνει αυτό ότι μέσω των σημείων αυτών γίνεται η διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των σημείων αυτών αποτελεί την επιφάνεια σύσφιξης A_b . Η κατανομή τους εξαρτάται από το είδος των υλικών και της επιφάνειας.

Η δύναμη σύσφιξης F και η επιφάνεια A_b συνδέονται με την εμπειρική σχέση:

$$F = \xi \cdot H \cdot A_b$$

Όπου:

- H : η σκληρότητα της επαφής
- ξ : συντελεστής αναλογίας που κυμαίνεται από 0,2 έως 1

Η πραγματική επιφάνεια A_c της επαφής ορίζεται ως η επιφάνεια διέλευσης του ρεύματος από την άνοδο στην κάθοδο. Η επιφάνεια αυτή είναι πάντα μικρότερη από την A_b λόγω των διαφορών ξένων επικαθίσεων πάνω στην επαφή, είτε από σκόνη είτε από οξειδία που δημιουργούνται κατά την οξείδωση των επαφών.

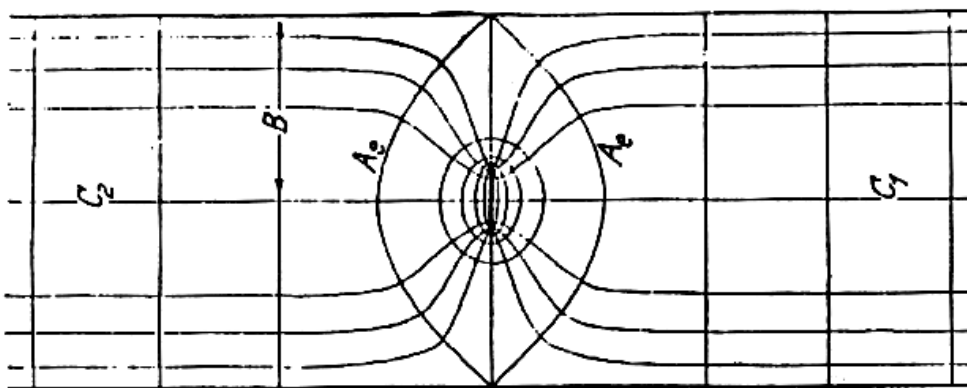
Η φαινόμενη επιφάνεια A_a της επαφής ορίζεται ως η παρατηρούμενη μακροσκοπικά επιφάνεια που οπτικά φαίνεται να εφάπτονται τα δύο μέρη της επαφής και είναι πολύ μεγαλύτερη από την A_c . Γενικά ισχύει ότι $A_c < A_b < A_a$ [12].

4.1.2 Αντίσταση στένωσης και αντίσταση επικαθίσεων

Το ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διέλευσή του από μία επαφή συναντά αντίσταση η οποία ονομάζεται αντίσταση διάβασης και αποτελείται από δύο συνιστώσες, την αντίσταση στένωσης R_c (constriction resistance) και

την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων R_f (film resistance). Η αντίσταση στένωσης είναι η συνολική αντίσταση των δύο επαφών του συνδέσμου (σχήμα 4.1.2-2). Η αντίσταση του στρώματος επικαθίσεων αντιπροσωπεύει την δυσκολία που συναντά το ρεύμα κατά τη διάβασή του από το στρώμα αυτό.

Η εξαναγκασμένη συμπύκνωση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος σε μία επαφή μπορεί να αναπαρασταθεί με την στένωση των ισοδυναμικών γραμμών ρεύματος. Θεωρώντας την ελλειπτική επιφάνεια A_c ως τη μόνη περιοχή από την οποία είναι δυνατό λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας να διέλθει το ρεύμα, η αντίσταση στένωσης R_c αποτελεί ουσιαστικά την αύξηση της αντίστασης λόγω της εξαναγκασμένης συμπύκνωσης των γραμμών ροής του ρεύματος (σχήμα 4.1.2-2).



Σχήμα 4.1.2-2: Σχηματική αναπαράσταση ροής ρεύματος και αντίστασης στένωσης R_c σε μία στατική ηλεκτρική επαφή

Η αντίσταση στένωσης R_c για κάθε σημείο (a-spot) (σχήμα 4.1.2-1) δίνεται από τη σχέση:

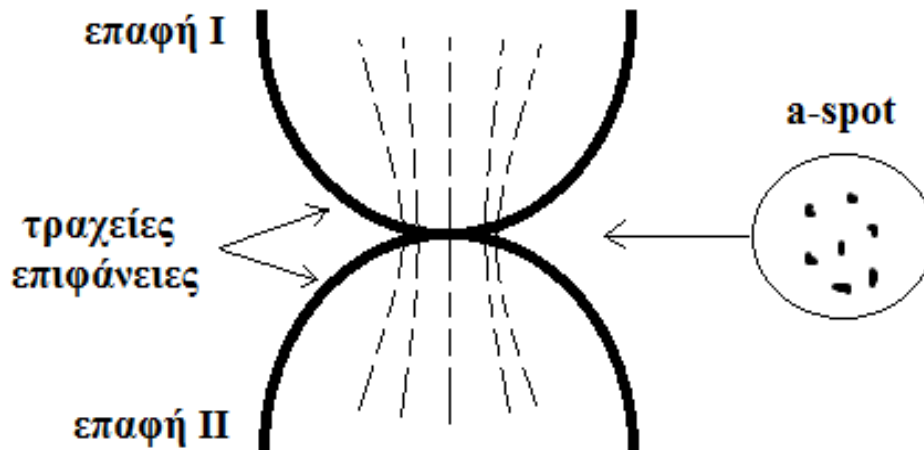
$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (4.1.2-1)$$

Όπου:

- ρ_1, ρ_2 : οι αντιστάσεις των δύο μετάλλων της επαφής
- a : η ακτίνα της περιοχής που εφάπτονται τα μέταλλα

Εάν τα δύο επαφές είναι από το ίδιο υλικό τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$R_c = \frac{\rho}{2\alpha} \quad (4.1.2-2)$$



Σχήμα 4.1.2-1: Σχηματική αναπαράσταση σημειακής επαφής δύο μετάλλων (*a-spot*)

Ο υπολογισμός της αντίστασης στένωσης έγινε βάσει των παρακάτω παραδοχών:

- Οι δύο επαφές αποτελούνται από το ίδιο υλικό
- Το υλικό αυτό είναι ιστροπικό με σταθερή ειδική αντίσταση
- Η θερμοκρασία είναι σταθερή σε όλα τα σημεία της ισοδυναμικής επιφάνειας A_c
- Για τον υπολογισμό της αντίστασης μεταξύ δύο διαδοχικών ισοδυναμικών επιφανειών ισχύει ότι $\Delta\Phi=0$, όπου Φ το δυναμικό.

Με τις παραδοχές αυτές δίνεται παρακάτω μία σύντομη απόδειξη της σχέσης (1.4.2-1) της αντίστασης στένωσης:

Σύμφωνα με τους Kottler και Smythe η αντίσταση στένωσης δίνεται από τον τύπο:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu)(\beta^2 + \mu)} \mu}$$

Όπου:

- α, β : οι ημιάξονες της έλλειψης σε cm
- ρ : η ειδική αντίσταση του μετάλλου των επαφών σε Ωcm
- μ : συντελεστής που εξαρτάται από τον λόγο της επιφάνειας A_c προς την A_a . Αν $A_c \ll A_a$ τότε $\mu \rightarrow \infty$.

Αν η περίμετρος της A_c είναι περιφέρεια της ακτίνας r τότε στην παραπάνω σχέση θα ισχύει ότι $\alpha = \beta = r$ και επομένως η αντίσταση στένωσης γίνεται:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{d\mu}{(r^2 + \mu)\sqrt{\mu}} = \frac{\rho}{2\pi} \text{arc tan } \frac{\sqrt{\mu}}{r} \quad (4.1.2-3)$$

Για $\mu \rightarrow \infty$ από την παραπάνω σχέση προκύπτει τελικά η σχέση (4.1.2-2).

Η σχέση (4.1.2-2) ισχύει για μία μόνο επιφάνεια A_c σε ολόκληρη την φαινόμενη επιφάνεια A_a . Στην περίπτωση i αριθμού επιφανειών ισχύει η γενικευμένη σχέση:

$$R_c = \sum_{i=1}^n R_{ci} = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (4.1.2-4)$$

Έχει διαπιστωθεί ότι η ακρίβεια της σχέση (4.1.2-2) είναι πολύ ικανοποιητική και συγκεκριμένα κυμαίνεται στο $\pm 1,5\%$.

Η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή επηρεάζεται από το γεγονός ότι η επιφάνεια των μετάλλων δεν είναι τελείως καθαρή αλλά έχει στρώματα επικαθίσεων οξειδίων, θείου και άλλων ανόργανων ενώσεων που συναντώνται συχνά στα μέταλλα.

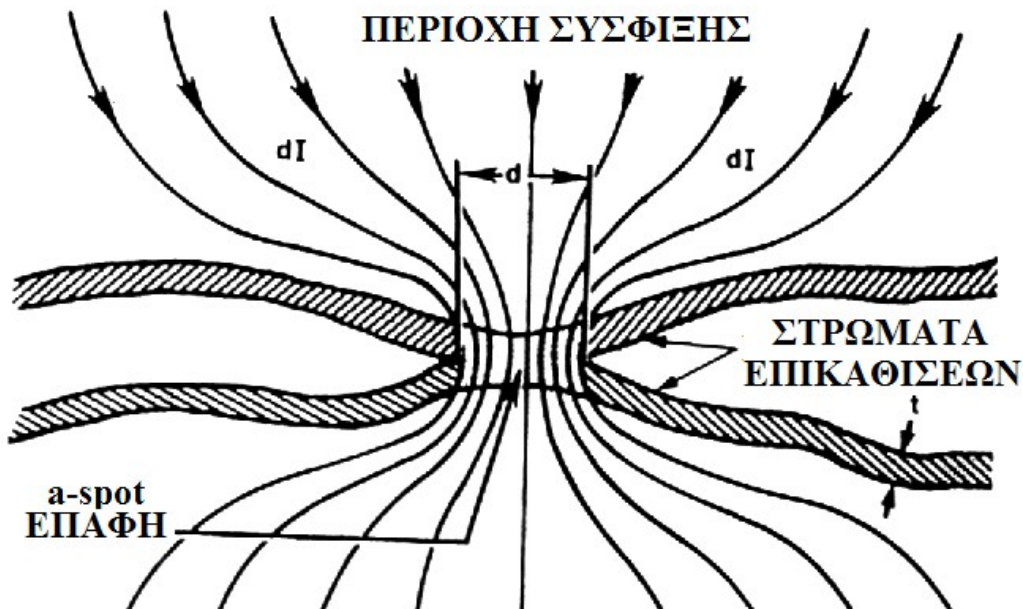
Η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές R_f δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$f = i \frac{\sigma}{n \alpha^2} R_c \quad (4.1.2-5)$$

5)

Όπου σ είναι η ανά μονάδα επιφανείας αντίσταση του υλικού.

Πρακτικά, η συνεισφορά των λεπτών στρωμάτων στην συνολική αντίσταση μπορεί να μην είναι αξιόλογη, αφού συνήθως τα a-spot σημεία από τα οποία διέρχεται το ρεύμα δημιουργούνται από μηχανική διάτρηση των στρωμάτων επιφανείας στην επαφή [12].



Σχήμα 4.1.2-1: Σχηματική αναπαράσταση της περιοχής σύσφιξης d μίας επαφής

4.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση στένωσης

Όπως στους αγωγούς η ωμική αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ίδια εξάρτηση έχει και η αντίσταση στένωσης R_c στις ηλεκτρικές επαφές. Αν γνωρίζουμε για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, T_1 , την αντίσταση στένωσης, $R_c(T_1)$, τότε μπορούμε να

υπολογίσουμε την αντίσταση, $R_c(T_2)$, σε κάθε άλλη θερμοκρασία, T_2 , μέσω της σχέσης:

$$R_c(T_2) = R_c(T_1) [1 + \alpha_x (T_2 - T_1)] \quad (4.1.3-1)$$

Όπου α_x ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης ο οποίος με θεωρητική προσέγγιση υπολογίζεται ότι είναι περίπου ίσος με τα 2/3 του θερμικού συντελεστή α , του υλικού των επαφών. Οπότε η σχέση (4.1.3-1) γίνεται:

$$R_c(T_2) = R_c(T_1) \left[1 + \frac{2}{3} \alpha (T_2 - T_1) \right] \quad (4.1.3-2)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, οι τιμές για συνήθη μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις επαφές είναι πολύ μικρή, της τάξης των $2 \cdot 10^{-4} \Omega$, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης διάβασης κρίνεται κυρίως από την αντίσταση του στρώματος των ξένων επικαθίσεων [12].

4.1.4 Η πτώση τάσης σε σχέση με την θερμοκρασία της ηλεκτρικής επαφής

Η θερμική και η ηλεκτρική ροή υπακούουν σε παρόμοιους νόμους. Η θερμική ενέργεια ρέει συνερτήσει των θερμοκρασιακών διαφορών και αντίστοιχα το ηλεκτρικό ρεύμα συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού. Σε συμμετρικά συστήματα ηλεκτρικών επαφών, η θερμική ροή ακολουθεί την ίδια διεύθυνση με τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ως εκ τούτου υπάρχει μία σχέση μεταξύ θερμοκρασιακής διαφοράς και διαφοράς δυναμικού. Η σχέση αυτή διερευνήθηκε κάτω από διάφορες παραδοχές, όπως π.χ. οι παραδοχές που προαναφέρθηκαν για τον υπολογισμό της αντίστασης στένωσης και επιπλέον ότι ο αγωγός που συνδέεται με την επαφή είναι μονωμένος θερμικά και ηλεκτρικά σε όλο το μήκος του.

Για την εξαγωγή ενεργειακής σχέσης που διέπει μία επαφή, έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές :

- Ως είσοδος του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται η πραγματική επιφάνεια επαφής A_c , και ως έξοδος μία επιφάνεια αρκετά μακριά από την είσοδο, ώστε η ροή σε αυτή να μην επηρεάζει την θερμική και ηλεκτρική ροή στο άμεσο περιβάλλον της επαφής. Θεωρείται δηλαδή ότι λαμβάνει χώρα διάδοση θερμότητας μόνο δι'αγωγής και κατά μήκος των αγωγών σύνδεσης και ότι δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στο άμεσο περιβάλλον της επαφής διά συναγωγής και ακτινοβολίας
- Το σύστημα των δύο μερών της ηλεκτρικής επαφής είναι συμμετρικό.

Η δεύτερη παραδοχή σημαίνει ότι οι δύο επαφές του συνδέσμου είναι από το ίδιο ισотροπικό υλικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία. Σημαίνει επίσης ότι η επιφάνεια της επαφής είναι ισοθερμική και ισοδυναμική και αυτή έχει την υψηλότερη θερμοκρασία του συστήματος, λόγω συμμετρίας του οποίου δεν συμβαίνει ροή της θερμότητας από το ένα μέρος της επαφής προς το άλλο.

Κάτω από αυτές τις παραδοχές ως συνάρτηση μεταξύ θερμοκρασίας T και ενεργού τιμής της τάσης U , για μία συμμετρική αντίσταση στένωσης ισχύει η σχέση [13]:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad (4.1.4-1)$$

Όπου:

- ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας των σημείων επαφής από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- T_0 : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- ρ : η ειδική αντίσταση

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή $\rho \cdot \lambda$ η σχέση γίνεται :

$$\rho \lambda \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (4.1.4-2)$$

$$\text{ή} \quad U = \sqrt{8 \rho \lambda \Delta T} \quad (4.1.4-3)$$

Η σχέση 4.1.4-3 δίνει τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί στις επαφές λόγω της αντίστασης στένωσης για συγκεκριμένη πτώση τάσης.

Σε περίπτωση που μέρος της παραγόμενης θερμότητας διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσο τότε η σχέση 4.1.4-2 γίνεται:

$$\rho \lambda \Delta T \leq \frac{U^2}{8} \quad (4.1.4-4)$$

$$\text{ή} \quad U \geq \sqrt{\rho \lambda \Delta T} \quad (4.1.4-5)$$

Σύμφωνα με το νόμο των Wiedemann - Franz – Lorenz ισχύει ότι:

$$\rho(T) \lambda(T) = \zeta \quad (4.1.4-6)$$

όπου $L = 2,4 \times 10^{-8} (\text{U}/^\circ\text{K})^2$

Τότε η σχέση 4.1.4-1 γίνεται:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \int_{T_0}^T L T dT = \frac{L}{2} (T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (4.1.4-7)$$

$$\text{ή} \quad U \geq 2 \sqrt{L (T^2 - T_0^2)} \quad (4.1.4-8)$$

Όπου T_0 : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Με τις σχέσεις 4.1.4-3, 4.1.4-5 και 4.1.4-8 μπορούμε να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση την πτώση τάσης στις επαφές χωρίς

επικαθίσεις. Σε πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές.

Η αντίσταση διάβασης σε συνάρτηση με την πώση τάσης ή τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον σύνδεσμο είναι ανάλογη με τη δύναμη σύσφιξης και την τιμή του ρεύματος.

Σχήμα 4.1.2-1: Σχηματική αναπαράσταση της αντίστασης διάβασης ε συναρτήσει της πτώσης τάσης και της θερμοκρασίας

Στο σχήμα (4.1.2-1) το τμήμα AB η αντίσταση διάβασης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της αντίστασης διάβασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 4.1.4-3. Στην περιοχή ΒΓ η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αύξηση της επιφάνειας A_c (προς την οποία η R είναι αντιστρόφως ανάλογη), λόγω μείωσης της σκληρότητας του υλικού από την ανακρυστάλλωση, που υφίσταται κατά την ανόπτηση. Όπως φαίνεται από το σχήμα (4.1.2-1) η περιοχή ΒΓ της θερμοκρασίας ανόπτησης για τον χαλκό είναι από 190 °C έως 200°C. Η περιοχή αυτή είναι για τον άργυρο 180°C έως 185°C. Στο τμήμα ΓΔ της χαρακτηριστικής $R = f(\Delta T)$ η επιφάνεια A_c φαίνεται ότι έχει σταθερή τιμή μετά την ανακρυστάλλωση και γι' αυτό η αντίσταση διάβασης αυξάνει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η ΓΔ είναι πρακτικά παράλληλη προς την AB. Σε αρκετά υλικά επαφών η παραπάνω αύξηση είναι σύντομη ή δεν υπάρχει, γιατί συνεχίζεται η ανακρυστάλλωση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σημείο Δ της χαρακτηριστικής συμβαίνει η τήξη του υλικού (η θερμοκρασία τήξης του χαλκού είναι 1083 °C). Η επιφάνεια A_c αυξάνει και υπάρχει μεταλλική συνέχεια μεταξύ των δύο μερών της επαφής, λόγω συγκόλλησης της. Η αύξηση της επιφάνειας A_c και η συγκόλληση των επαφών συνεπάγονται μείωση της αντίστασης διάβασης στην επαφή και αυτό φαίνεται στο τμήμα της καμπύλης ΔΕ.

Όταν από το σημείο Ε της χαρακτηριστικής μειωθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η αντίσταση διάβασης γίνεται μικρότερη (τμήμα ΕΖ). Η ΕΖ είναι πρακτικά παράλληλη προς την ΑΒ.

Το τμήμα ΑΒ της χαρακτηριστικής αποδίδει την ιδανική συμπεριφορά των επαφών (σταθερή επιφάνεια A_c), τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη όμως η επιφάνεια A_c δεν έχει σταθερή τιμή γιατί η σκληρότητα των υλικών της επαφής μεταβάλλεται από τις αυξομειώσεις της θερμότητας που παράγεται, σε συνδυασμό με τις θλιπτικές τάσεις.

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις επαφών οι οποίες έχουν συγκολληθεί υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας, το τμήμα ΕΖ στο σχήμα (4.1.2-1) είναι το ίδιο, τόσο κατά την αύξηση όσο και τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (η επιφάνεια A_c μένει σταθερή λόγω της συγκόλλησης). Στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία είναι μικρότερη από εκείνη του σημείου τήξης και βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία ανόπτησης, η χαρακτηριστική μπορεί να είναι η ίδια κατά την αύξηση ή μείωση της τιμής του ρεύματος, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα (4.1.2-1) με διακεκομμένη γραμμή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από την ψυχρή συγκόλληση που συμβαίνει σε καινούργιες και καθαρές επαφές. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση οι επαφές πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν σχεδόν κολλήσει αν και η θερμοκρασία τους δεν έχει φθάσει στο σημείο τήξης.

Από τη χαρακτηριστική $R = f(U)$ ή $R = f(\Delta T)$ του σχήματος (4.1.2-1) παρατηρείται ότι οι περιοχές τιμών της θερμοκρασίας και της πτώσης τάσης σε μια επαφή, που συνεπάγονται ανακρυστάλλωση στα υλικά των επαφών (περιοχή ΒΓ), αποτελεί την έναρξη της αποσταθεροποίησης της επαφής. Πέρα από αυτή την περιοχή οι επαφές που λειτουργούν υπό ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να θεωρούνται ότι έχουν ουσιαστικά καταστραφεί. Η θεωρία που διατυπώθηκε για τη χαρακτηριστική του σχήματος (4.1.2-1) αφορά καθαρές επαφές χωρίς αξιόλογο στρώμα επικαθίσεων σε αυτές. Σε περιπτώσεις που το στρώμα των επικαθίσεων

έχει σημαντικό πάχος και καλύπτει μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας A_c , η χαρακτηριστική του σχήματος (4.1.2-1) δεν ισχύει και παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στα αρχικά στάδια λειτουργίας τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία [12,13,14,15,16].

4.1.5 Οξείδωση ηλεκτρικών επαφών

Όπως προαναφέρθηκε η επιφάνεια της επαφής επηρεάζεται έντονα από την παρουσία οξείδωσης και επικαθίσεων. Οι επικαθίσεις διακρίνονται βάσει πάχους στις εξής κατηγορίες:

- *Πάχος λίγων ατόμων*
- *Προστατευτικές επικαθίσεις:* αποτελούνται από χημικές ενώσεις και φτάνουν μέχρι ένα ορισμένο μικρό πάχος. Ονομάζονται έτσι διότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής.
- *Επικαθίσεις που συμμετέχει το μέταλλο της επαφής:* το πάχος τους αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

Η κύρια αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης της επαφής είναι οι επικαθίσεις και αποτελούν τον βασικό λόγο της κακής λειτουργίας τους. Μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τη σύνθεσή τους σε χημικές ενώσεις και σε παρασιτικά στοιχεία όπως η σκόνη και οι υδρατμοί.

Πολλές χημικές ενώσεις με το χρόνο δημιουργούν στρώμα πάνω από την επιφάνεια της επαφής από 10 έως 100Å με αποτέλεσμα να την προστατεύουν από την επίδραση του οξυγόνου και άλλων χημικών στοιχείων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν το ανοξείδωτο ατσάλι και το αλουμίνιο, τα οποία έχουν ιδιαίτερος προστατευτικά οξειδία, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα οξειδία του χαλκού και του νικελίου που δεν είναι αποτελεσματικά και αυξάνονται με το χρόνο αυξάνοντας έτσι σταδιακά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Από τα σοβαρότερα προβλήματα αλλοίωσης των χαρακτηριστικών των επαφών είναι η οξείδωση των μετάλλων από τα οποία είναι φτιαγμένοι. Παρακάτω αναλύονται τα οξειδία μερικών μετάλλων που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ηλεκτρικούς συνδέσμους.

Το οξείδιο του χαλκού Cu_2O αναπτύσσεται σταδιακά από τους 40°C έως τους 200°C. Το οξείδιο αυτό έχει αντίσταση $10^{10} \mu\Omega/cm$. Λόγω της μαλακότητάς τους είναι πιθανή η διάτρησή τους. Το πάχος του στρώματος

του οξειδίου αυτού συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορεί αν υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{(14.9 - 5100/\theta)}$$

Όπου:

s: πάχος σε Å

t: χρόνος σε ώρες

θ: θερμοκρασία σε K

Σε θερμοκρασία έως 400°C δημιουργείται το οξείδιο Cu₂O, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες CuO. Όταν έχουν μεγαλύτερο πάχος από 100 Å τότε μειώνεται η ηλεκτρική λειτουργία της επαφής. Παρόμοια κατανομή ακολουθεί και το NiO το πάχος του οποίου υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$s^2 = 5^2 + t \cdot 10^{(13.3 - 6000/\theta)}$$

Το οξείδιο του ψευδαργύρου δεν θεωρείται κατάλληλο για το σχηματισμό των επαφών. Είναι ένα μέταλλο που δημιουργεί προστατευτικό στρώμα χαμηλής σκληρότητας, αυξάνοντας έτσι την πραγματική επιφάνεια A_c υπό την επίδραση σύσφιξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης της επαφής και την μετέπειτα οξείδωσή της. Κατά την επαφή το προστατευτικό στρώμα του ψευδαργύρου αποχωρίζεται από την επιφάνεια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αγωγιμες περιοχές οι οποίες με το χρόνο οξειδώνονται και έτσι η αντίσταση διάβασης μεγαλώνει, μεγαλώνοντας ταυτόχρονα την δευτερογενή οξείδωση.

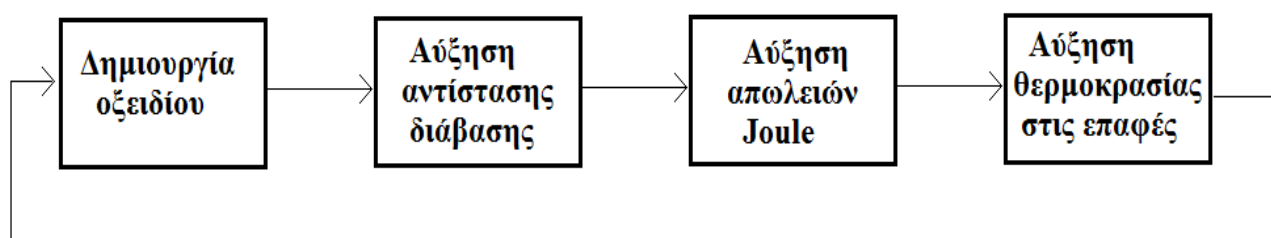
Δύο ακόμη ακατάλληλα μέταλλα για τη δημιουργία επαφών είναι το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο. Το οξείδιό τους έχει πάχος έως 50 Å σε θερμοκρασία δωματίου και ένα μεγάλο κομμάτι αυτού καταστρέφεται κατά την επαφή με αποτέλεσμα τη διέλευση ρεύματος από τα αποκολλημένα στρώματα οξειδίου, λόγω του φαινομένου σήραγγος.

Αντιθέτως, ένα άριστο υλικό για την κατασκευή επαφών είναι ο χρυσός, γιατί δεν οξειδώνεται στον αέρα. Στην επιφάνειά του η μοναδική επικάλυψη είναι ένα στρώμα ατόμων οξυγόνου, όπως σε κάθε μέταλλο, η οποία παραμένει αμετάβλητη σε πάχος και διαβατή από ηλεκτρονία κατά

το φαινόμενο της σήραγγος. Παρόλα τα πλεονεκτήματά του δε χρησιμοποιείται λόγω του πολύ υψηλού κόστους.

Ο άργυρος σε συνθήκες όζοντος σχηματίζει το οξείδιο Ag_2O το οποίο έχει χαμηλή σκληρότητα, αποκολλάται από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους 200°C . Δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Ο άργυρος μπορεί να προσβληθεί από ενώσεις του θείου και να σχηματίσει ένα στρώμα Ag_2S το οποίο δεν προστατεύει την επιφάνεια, είναι πολύ ανθεκτικό και αυξάνεται αργά και σταθερά με το χρόνο.

Ο μηχανισμός της δημιουργίας των οξειδίων είναι μια κυκλική επαναλαμβανόμενη διαδικασία η οποία μπορεί να παρασταθεί με το παρακάτω απλοποιημένο διάγραμμα [12]:



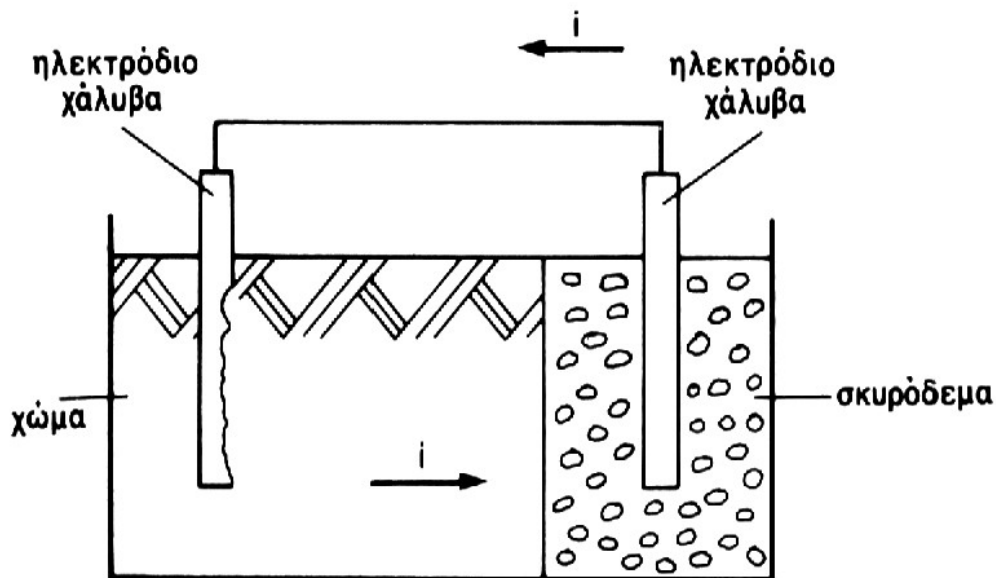
Σχήμα 4.1.5-1: Διαδικασία δημιουργίας οξειδίου των μετάλλων των ηλεκτρικών επαφών

4.1.6 Γαλβανική διάβρωση ηλεκτρικών επαφών

Στις ηλεκτρικές επαφές που αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα εμφανίζεται μία παράμετρος μείωσης της ποιότητας και αξιοπιστίας της επαφής που ονομάζεται γαλβανική διάβρωση. Το φαινόμενο αυτό χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- *Ιδιοδιάβρωση*: εμφανίζεται όταν ένα μέταλλο είναι μόνο του στο έδαφος τότε το υλικό του αντιδρά με το περιβάλλον προκαλώντας βαθμιαία χημική διάβρωση που εξαρτάται από τον αερισμό του χώματος, την υγρασία και το pH του.
- *Ηλεκτροχημική διάβρωση επαφής*: εμφανίζεται στην επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων, ενταφιασμένων ή μη. Κάθε μέταλλο εμφανίζει ηλεκτροχημικό δυναμικό, δηλαδή τάση μεταξύ αυτού και της γης. Η τάση αυτή εξαρτάται από το μέταλλο και το περιβάλλον έδαφος. Κατά την ένωση των δύο μετάλλων η διαφορά της ηλεκτροχημικής τους

τάσης προκαλεί την εκδήλωση ροής ιόντων (ρεύματος) από την άνοδο προς την κάθοδο με αποτέλεσμα να αφαιρείται υλικό από το ηλεκτραρνητικότερο μέταλλο. Ροή ιόντων μπορεί να εμφανιστεί και σε ηλεκτρόδια ίδιου υλικού που βρίσκονται όμως σε διαφορετικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα χάλυβας σε χώμα και χάλυβας σε σκυρόδεμα (σχήμα 4.1.6-1) [12].



Σχήμα 4.1.6-1: Διάβρωση μεταλλικής επαφής από χάλυβα σε διαφορετικό περιβάλλον

4.1.7 Υγρασία στις ηλεκτρικές επαφές

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η υγρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που συντελεί στην κακή και μη ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, χωρίς να αποτελούν εξαίρεση οι ηλεκτρικές επαφές. Το πάχος του στρώματος της υγρασίας στους συνδέσμους είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειάς τους. Η παρουσία στρώματος υγρασίας σε συνδυασμό με τα οξείδια και τον άνθρακα προκαλούν τοπικά ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία με ηλεκτροχημική δράση οδηγούν γρηγορότερα στην οξείδωση των επαφών απ'ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Η αντίδραση αυτή όμως δημιουργείται κυρίως κάτω από υψηλά επίπεδα υγρασίας, περί το 70%, παρουσία λεπτών, μη συνεχόμενων αγωγίμων στρωμάτων νερού και υγροσκοπικών τεμαχίων σκόνης.

Κλείνοντας ένας διακόπτης, δημιουργεί πίεση ανάμεσα στις δύο επαφές απομακρύνοντας ένα μεγάλο ποσοστό νερού, με αποτέλεσμα να απομένουν απλές αγωγιμες στοιβάδες ατόμων. Οι στοιβάδες αυτές μπορούν να επηρεάσουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης σε αντίθεση με στερεά κατάλοιπα μαύρου χρώματος και μικρού πάχους (10\AA) τα οποία προσκωλλόμενα στην επιφάνεια της επαφής παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση και προκαλούν αύξηση της αντίστασης διάβασης. Ένας λόγος για το φαινόμενο αυτό είναι η μείωση την ικανότητας απαγωγής της θερμότητας από επιφάνειες σκούρου χρώματος. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνήθως άμορφες οργανικές ουσίες, μεγάλου μοριακού βάρους, που προέρχονται από οργανικούς ατμούς των μονωτών στήριξης των επαφών.

Ένα ακόμα παρόμοιο φαινόμενο είναι ο πολυμερισμός των υδρογονανθράκων κατά τον οποίο πολλά μονωτικά υλικά παράγουν οργανικούς ατμούς δημιουργώντας επικαθίσεις στην επιφάνεια των επαφών. Τέτοιου είδους υλικά είναι το παλλάδιο (Pd), ο λευκόχρυσος (Pt), το ρουθίνιο (Ru) και το χρώμιο (Cr), σε αντίθεση με το χαλκό (Cu), το σίδηρο (Fe), το βολφράμιο (W), τον άργυρο (Ag) και το νικέλιο (Ni) που δεν παράγουν οργανικούς ατμούς.

Τα οργανικά αυτά στρώματα σε περίπτωση μικρών ηλεκτρικών εκκενώσεων απανθρακώνονται δημιουργώντας στρώματα άνθρακα που διευκολύνουν την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων μεγαλύτερης εμβέλειας και ενέργειας [12].

4.2 Μη γραμμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές επαφές

4.2.1 Φαινόμενο σήραγγος

Το φαινόμενο σήραγγος αναφέρεται στην δυνατότητα διείσδυσης των ηλεκτρονίων στα ανώτερα λεπτά στρώματα μερικών υλικών, όπως στα μέταλλα.

Το δυναμικό μίας μεταλλικής επαφής με απόσταση s μεταξύ των δύο μερών της λόγω πιθανών επικαθίσεων αποτελείται από δύο στάθμες Fermi και το φράγμα δυναμικού (σχήμα 4.2.1-1α). Έστω ότι η επαφή αποτελείται από δύο μέρη με ίδιο υλικό, τότε τα επίπεδα Fermi τους θα συμπίπτουν. Όταν η απόσταση s είναι αρκετά μεγάλη το φράγμα δυναμικού, που προκύπτει από την συμβολή των φραγμάτων κάθε μέρους της επαφής, αγγίζει την μέγιστη τιμή του, ϕ_0 , ίση με το έργο εξόδου Φ του

μετάλλου. Όταν το s είναι μικρό τα φράγματα δυναμικού των δύο μερών αλληλεπιδρούν και προκύπτει φράγμα με μικρότερη τιμή από το έργο εξόδου.

Για τα ηλεκτρόνια που εγκίζουν το φράγμα ισχύει η σχέση:

$$\frac{1}{2} m v_x^2 = q_e E_x \quad (4.2.1-1)$$

Όπου:

- m : η μάζα του ηλεκτρονίου
- v_x : η κάθετη στο φράγμα συνιστώσα της ταχύτητας του ηλεκτρονίου
- q_e : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- E_x : το δυναμικό του ηλεκτρονίου

Αν $E_x > \phi_0$ το ηλεκτρόνιο θα περάσει στο απέναντο μέρος της επαφής εκπέμποντας την υπόλοιπη ενέργεια σε μορφή ακτινοβολίας (θερμιονική εκπομπή).

Αν $E_x < \phi_0$ το ηλεκτρόνιο θα ανακλαστεί εκτός από μία μικρή πιθανότητα να περάσει το φράγμα δυναμικού. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από τον συντελεστή διάβασης $D(E_x)$ και υπολογίζεται με τη σχέση:

$$D(E_x) = \exp \left[\frac{-4\pi}{h} \int_0^s \sqrt{2m[\Phi(x) - E_x]} dx \right] \quad (4.2.1-2)$$

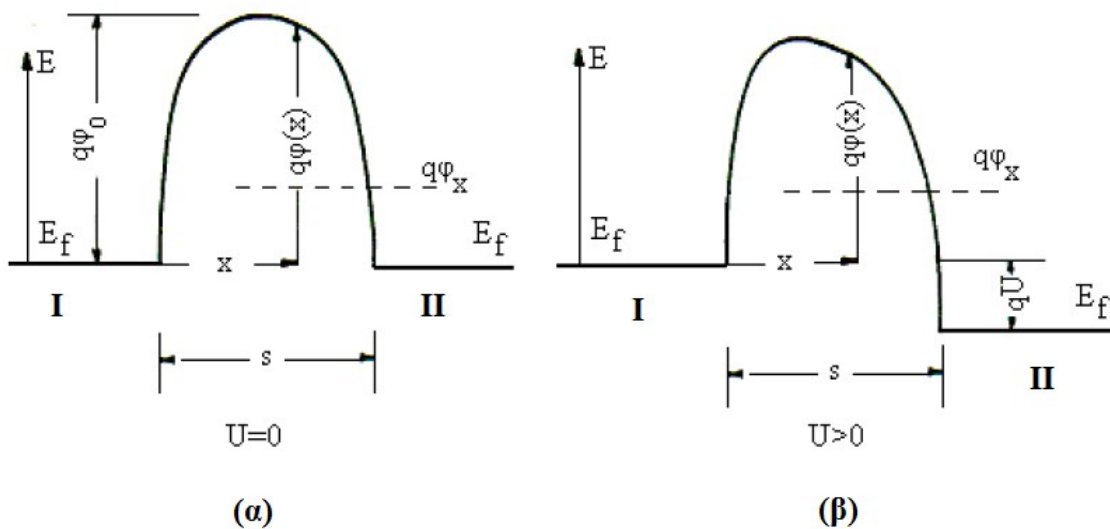
Όπου:

- h : η σταθερά Planck
- $\phi(x)$: η συνάρτηση του φράγματος δυναμικού

Κατά το φαινόμενο σήραγγος όταν το ηλεκτρόνιο καταφέρει να περάσει το φράγμα δυναμικού, δεν αποδίδει την υπόλοιπη ενέργειά του με ακτινοβολία όπως στην θερμιονική εκπομπή, αλλά την αποδίδει στην άνοδο. Η μετάβαση των ηλεκτρονίων από την μία επαφή στην άλλη είναι αμφίδρομη και ισοδύναμη με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τελικά ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Σε περίπτωση εφαρμογής διαφοράς δυναμικού U μεταξύ των δύο επαφών, οι στάθμες Fermi απέχουν κατά τη διαφορά αυτή (σχήμα 4.1.8-1-

β), με αποτέλεσμα η μετάβαση των ηλεκτρονίων από την επαφή με υψηλότερο δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλότερο να γίνει μεγαλύτερη από την αντίθετη μετάβαση και έτσι να παρατηρείται ηλεκτρικό ρεύμα. Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (4.2.1-1) και (4.2.1-2) μόνο η κάθετη στο φράγμα δυναμικού συνιστώσα είναι ωφέλιμη για τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από την μία επαφή στην άλλη. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένα ηλεκτρόνιο έχει μεγάλη ταχύτητα (άρα και μεγάλη ενέργεια) αλλά η κάθετη προς το φράγμα δυναμικού συνιστώσα της δεν είναι πολύ μεγάλη υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην καταφέρει να μεταβεί στην άλλη επαφή αλλά να ανακλαστεί πάνω σε αυτό στο φράγμα.



Σχήμα 4.2.1-1: Δυναμικό μεταλλικής επαφής

I: άνοδος

II: κάθοδος

U: διαφορά δυναμικού

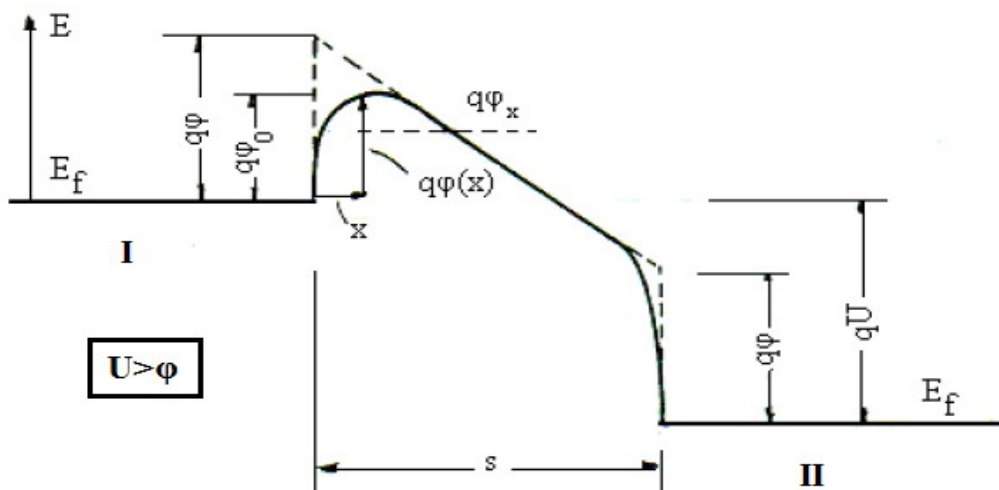
$q\phi_0$: ενέργεια φράγματος δυναμικού

$q\phi(x)$: ενέργεια εξόδου

Το φαινόμενο της σήραγγος στις επαφές μέταλλο-μονωτής-μέταλλο υπό συνεχή τάση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

- $\phi_0 \gg U > 0$: όταν η εφαρμοζόμενη τάση U είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 , η πυκνότητα ρεύματος J είναι ανάλογη της τάσης U, δηλαδή το φαινόμενο θεωρείται ωμικό.

- $\phi_0 > U$: όταν η εφαρμοζόμενη τάση U είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση τότε η πυκνότητα ρεύματος J αυξάνει γραμμικά σε σχέση με την τάση U .
- $U > U_0$: όταν η εφαρμοζόμενη τάση U έχει μεγαλύτερη τιμή από τις προηγούμενες περιπτώσεις και ισχύει ότι $U > U_0$,τότε η πυκνότητα ρεύματος J αυξάνει απότομα με την αύξηση της τάσης U . Στην περίπτωση αυτή το ύψος του φράγματος δυναμικού ϕ_0 είναι αρκετά μικρότερο από το έργο εξόδου Φ , με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να μεταπηδούν πάνω από το φράγμα δυναμικού (σχήμα 4.2.1-2). Η περίπτωση αυτή ονομάζεται εκπομπή πεδίου.



Σχήμα 4.2.1-2: Δυναμικό μεταλλικής επαφής

I: άνοδος

II: κάθοδος

Ορίζεται η ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_T (tunnel resistivity) του συστήματος δύο ηλεκτροδίων ως το πηλίκιο:

$$\rho_T = \frac{U}{J} (\Omega m^2) \quad (4.2.1-3)$$

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το πάχος s , το έργο εξόδου του μετάλλου των επαφών (θεωρώντας ότι είναι από το ίδιο υλικό) , την

μορφή του φράγματος δυναμικού και την διηλεκτρική σταθερά ϵ_r των επικαθίσεων, δηλαδή ισχύει:

$$\rho_T = f(s, \Phi, U, \epsilon_r, \varphi(x)) \quad (4.1.8-4)$$

Από τις σχέσεις (4.2.1-1) και (4.2.1-2) φαίνεται ότι για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος J είναι απαραίτητη η εύρεση της συνάρτησης $\varphi(x)$. Με το θέμα αυτό ασχολήθηκαν πολλοί ερευνητές και έγιναν διάφορες προσπάθειες προσέγγισης της συνάρτησης. Μία εξ αυτών είναι η προσέγγιση για μικρές τιμές της τάσης U, χαμηλές θερμοκρασίες ($T=0$) και για μεγάλο πάχος s, σύμφωνα με την οποία η $\varphi(x)$ θεωρείται ότι έχει σχήμα τραπεζίου. Μία άλλη προσέγγιση για μικρό πάχος s, θεωρεί την $\varphi(x)$ παραβολική. Σύμφωνα με αυτή λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της θερμοκρασίας, ανάλογα προς την οποία αυξάνεται η ενεργειακή στάθμη Fermi, βοηθώντας τους φορείς ηλεκτρικού φορτίου να διαπεράσουν το φράγμα δυναμικού.

Το φαινόμενο της σήραγγος σε μία επαφή σχετίζεται με την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων R_f σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho_T}{\pi r^2} \quad (4.2.1-5)$$

Όπου:

- ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού
- ρ_T : η ειδική αντίσταση σήραγγος μεταξύ των δύο επαφών
- r : η ακτίνα της επιφάνειας A_c

Στον πίνακα (4.2.1-1) δίνονται οι τιμές της δύναμης σύσφιξης, της αντίστασης στένωσης, της αντίστασης του στρώματος επικαθίσεων και την συνολικής αντίστασης διάβασης για συνήθη υλικά των ηλεκτρικών επαφών για θερμοκρασία περιβάλλοντος [12,13,14,15].

Υλικό επαφών	Δύναμη σύσφιξης επαφών F (g)	Ειδική αντίσταση σήραγγος ρ_T ($10^{-13} \Omega m^2$)	Αντίσταση στένωσης $R_c = \rho / 2r$ ($10^{-4} \Omega$)	Αντίσταση στρώματος επικαθίσεων $R_f = \rho / \pi r^2$ ($10^{-4} \Omega$)	Αντίσταση διάβασης R ($10^{-4} \Omega$)
Au-Au	35	5	3,94	1,86	5,8
Cu-Cu	35	4,6	7	87	94
Ni-Ni	35	54	45	154	199

Πίνακας 4.2.1-1: Αντίσταση διάβασης για διάφορα συνήθη υλικά ηλεκτρικών επαφών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

4.2.2 Φαινόμενο μεταφοράς

Τα φαινόμενα που προαναφέραμε σχετίζονται άμεσα με την μεταφορά ηλεκτρικών φορέων μέσω διάφορων περιοχών της επαφής υπό τη μορφή υψηλής πυκνότητας ρεύματος.

Η ύπαρξη στρωμάτων οξειδίων και γενικά επικαθίσεων, καθώς και η αύξηση του εύρους τους μετά τη γήρανση, φαίνεται να εμποδίζουν την εύρεση ικανοποιητικών μεθόδων υπολογισμού της μείωσης της οριακής τιμής της τάσης προ και μετά γήρανσης των επαφών κατά την ανάπτυξη μη γραμμικών φαινομένων (πίνακας 4.2.2-1). Για την εξαγωγή όμως μερικών συμπερασμάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη όμοιων εντάσεων ρεύματος προ και μετά γήρανσης.

Τύπος επαφής	Υλικό επαφών	Με θερμική καταπόνηση		Χωρίς θερμική καταπόνηση		Γραμμική παρεμβολή στις τιμές I^* , ΔU^*	
		I [A]	ΔU [mV]	I^* [A]	ΔU^* [mV]	$I^{*'}$ [A]	$\Delta U^{*'}$ [mV]
αποζεύκτης 500V/100A	Αργυρος	37	19	44	21	37	17,6
αποζεύκτης 500V/100A	Χαλκός	26	13	36	16	26	11,5
αποζεύκτης 20kV/200A	Χαλκός	48	21	52	22	48	20,3
Ασφαλειοθήκη 20kV/100A	Ορείχαλκος	67	24	73	24	67	22,0

Πίνακας 4.2.2-1: Τιμές οριακής τάσης ΔU και ρεύματος πέραν των οποίων εμφανίζεται μη γραμμική συμπεριφορά στις επαφές

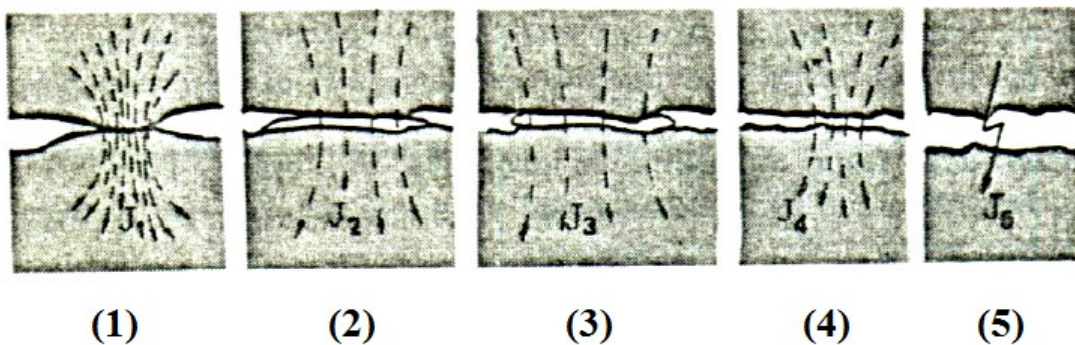
Παρά τις δυσκολίες οι οποίες εμφανίζονται κατά τη γήρανση της επαφής, η μη γραμμική συμπεριφορά μπορεί να επεξηγηθεί ικανοποιητικά μέσω των παρακάτω μικροδομών :

- (1) *Μικροδομή MM* : αναφέρεται στην ιδεατή επαφή των δύο μερών της επαφής χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου.
- (2) *Μικροδομή MIM* : μέταλλο-μονωτής-μέταλλο.
- (3) *Μικροδομή MOM* : μέταλλο-οξείδιο-μέταλλο.
- (4) *Μικροδομή MGM* : μέταλλο-υγρό ή αέριο μονωτικό-μέταλλο.

Η κατανομή των παραπάνω μικροδομών είναι στατιστική. Η ροή του ρεύματος μέσω των μικροδομών MIM σχετίζεται με την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος. Η μικροδομή MGM συμπεριφέρεται ως ηλεκτρομονωτική διάταξη.

Οι φυσικές ερμηνείες που αφορούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με την μεταφορά των ηλεκτρικών φορέων μέσα από τις διάφορες περιοχές επαφής (Ac), οι οποίες διαπερνώνται από υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Με βασική αιτία την ανομοιομορφία στην επιφάνεια των επαφών, η οποία μπορεί να είναι μορφολογικής ή ηλεκτροχημικής φύσεως, το πεδίο μεταξύ των επαφών ενδέχεται να παρουσιάζει ανομοιογένειες. Έχει διαπιστωθεί ότι ένα μικρό μέρος της φαινόμενης επιφάνειας της επαφής A_a άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος υποχρεώνονται να διέλθουν πολύ κοντά η μια στην άλλη ώστε να περάσουν από τις μικρές αγωγίμες

περιοχές (οι οποίες απαρτίζουν την επιφάνεια A_c) οι οποίες είναι στατιστικά κατανομημένες στην επιφάνεια A_a και οι οποίες συχνά καλύπτονται από στρώμα επικαθίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο ποικίλλει στην περιοχή της επαφής αφού και οι δύο επιφάνειες διαπερνώνται επιλεκτικά από υψηλή πυκνότητα ρεύματος και σύμφωνα με τον νόμο του Ohm θα πρέπει να υπάρχει επιφανειακή πτώση τάσης μεταξύ των σημείων διάβασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, η διαχωριστική επιφάνεια των δυο μεταλλικών μερών παύει να είναι ισοδυναμική. Εκτός τούτου, η παρουσία ακινήτων φορτίων ανά την επαφή (όπως: σταθερά, παγιδευμένα και φορτία ιόντων), εισάγει κατοπτρικά ηλεκτρικά φορτία τα οποία κατανέμονται σε ένα ορισμένο βάθος από την επιφάνεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια επαφής ακόμα και όταν δεν εφαρμοστεί εξωτερική τάση, ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό της εξάντλησης–αναστροφής των ημιαγώγιμων επιφανειών.



Σχήμα 4.2.2-1: 1) Ιδεατή επαφή μέταλλο – μέταλλο (MM).

2) Μικροδομή μέταλλο – μονωτής – μέταλλο (MIM)

3) Μικροδομή μέταλλο – οξείδιο – μέταλλο (MOM)

4,5) Μέταλλο – περιβάλλον υγρό ή αέριο μονωτικό – μέταλλο (MGM).

J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 : πυκνότητες ρεύματος.

Οι περιοχές αυτές μπορούν να γίνουν αγώγιμες πέραν μίας οριακής τιμής του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου.

Το σχήμα (4.2.2-1) παρουσιάζει μακροσκοπικά τα δύο μέρη της επαφής. Οι περιοχές M-M οι οποίες εφάπτονται ιδανικά χωρίς την παρεμβολή άλλου μέσου (1), είναι διανεμημένες τυχαία ανάμεσα σε περιοχές οι οποίες άγουν δια του φαινομένου σήραγγος (2) και (3). Οι περιοχές (2) και (3) ορίζονται από την στατιστική κατανομή της ανάπτυξης οξειδίων του μετάλλου στην περιοχή της επαφής και

συμπεριφέρονται σαν λεπτά υμένα υλικών τα οποία πρέπει να τα διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από την επαφή. Οι περιοχές που άγουν δια του φαινομένου σήραγγος και έχουν πάχος της τάξης των 50Å ή και λιγότερο, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως μικροδομές μέταλλο-οξειδίο-μέταλλο (MOM) ή μέταλλο-μονωτής-μέταλλο (MIM). Έχει παρατηρηθεί ότι οι επαφές των μετάλλων καλύπτονται αμέσως από λεπτό στρώμα οξειδίου ή άλλων χημικών ενώσεων πάχους 10.50 Å μόλις έρθουν σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν το πάχος του οξειδίου είναι μικρότερο από τα 50 Å το φαινόμενο σήραγγος λαμβάνει χώρα ακόμα και για μικρή πτώση τάσης, δηλαδή <55 mV, αφού το ηλεκτρικό πεδίο στις μικροδομές μπορεί να φτάσει μέχρι 1 MV/cm. Αυτή η υψηλή τιμή πεδίου αναμένεται να αναπτύσσεται στις προαναφερθείσες μικροδομές αφού πειραματικά παρατηρήθηκε ότι η πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών ήταν της τάξης των 50 mV και δημιουργεί πεδία της τάξης των 0,1 MV/cm έως 0,5 MV/cm ή και περισσότερο ανάλογα με το πάχος των επικαθίσεων. Τα πεδία αυτά έχουν την δυνατότητα να δημιουργούν μέχρι και συνθήκες εκπομπής πεδίου για τη μεταφορά των φορέων μεταξύ των συνδέσμων. Οι διάφορες θέσεις στην επαφή οι οποίες εγχέουν τα φορτία είναι τυχαία κατανομημένες μέσα στην φαινόμενη περιοχή επαφής και ενεργοποιούνται μόλις το τοπικό πεδίο αναπτυχθεί σε τιμές 0,1 MV/cm περίπου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρότι η κλασσική θεωρία εκπομπής πεδίου, όπως προτάθηκε από τους Fowler και Nordheim, προβλέπει πεδία της τάξεως των 40 MV/cm, πρακτικά τα απαιτούμενα πεδία που εφαρμόζονται είναι κατά πολύ μικρότερα. Αυτό αποδίδεται σε ανομοιογένειες του πεδίου στην επιφάνεια των υλικών και την ύπαρξη παγιδευμένων φορτίων τα οποία δημιουργούν τοπικές συνθήκες αύξησης του πεδίου.

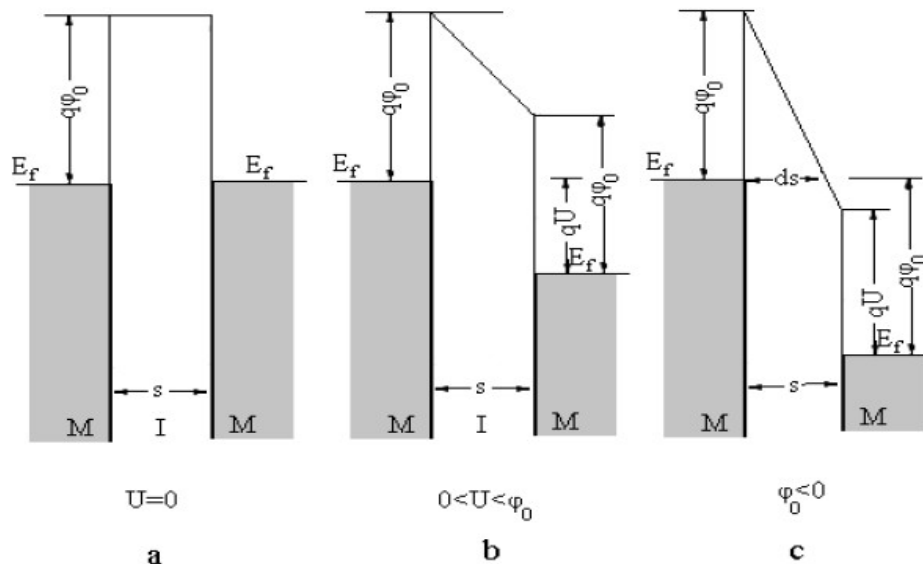
Καθώς η ροή του ρεύματος διαμέσου των επαφών αυξάνει, τα φαινόμενα της επιφανειακής σκέδασης αρχίζουν να κυριαρχούν μόλις η διάβαση του φορτίου διαμέσου των ωμικών κέντρων (spots) φτάσει στον κορεσμό. Τότε η διαφορά δυναμικού κατά μήκος των μικροδομών MIM, MOM και MGM αυξάνει ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές από μια κρίσιμη τιμή πεδίου, περιοχές της επαφής οι οποίες έχουν ένα σημαντικό πάχος επικαθίσεων μπορούν και αυτές να άγουν. Επίσης περιοχές της επαφής οι οποίες δεν έχουν επικαθίσεις, αλλά χωρίζονται από διάκενο (στο οποίο έχει εισχωρήσει το υγρό ή αέριο μονωτικό μέσο που περιβάλλει την επαφή όπως αέρας, λάδι, SF₆ κλπ) όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2.2-1) (4)

και (5) μπορούν επίσης να καταστούν αγώγιμες μόλις το πεδίο στα σημεία αυτά γίνει ικανό να εγχέει ηλεκτρόνια (εκπομπή πεδίου). Ιδεατά αυτές οι περιοχές θα έπρεπε να γίνουν ενεργές για τιμές της έντασης ρεύματος πέρα από το ονομαστικό ρεύμα της κάθε επαφής. Τον κύριο παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια της εκπομπής πεδίου αποδίδουν την επιπλέον ενέργεια τους μόλις προσκρούσουν στο θετικό ηλεκτρόδιο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα περίπου 10-12 sec. Τέτοια φαινόμενα αυξάνουν έντονα τη θερμοκρασία των επαφών, ιονίζουν το διάκενο και αυξάνουν δραστικά την αγωγιμότητα, οδηγώντας στην ανεπιθύμητη δημιουργία τόξων.

Τα ηλεκτρόνια του φαινομένου σήραγγος μόλις μεταφερθούν στο άλλο μέρος του λυόμενου συνδέσμου αποδίδουν επιφανειακούς ρυθμούς ενεργειακών ταλαντώσεων που χαρακτηρίζονται από μη συγκεκριμένα ενεργειακά όρια. Οι ρυθμοί αυτοί με την παρουσία της επιφανειακής τραχύτητας μπορούν να μετατραπούν σε φωτόνιο. Η ενέργεια των φωτονίων εξαρτάται από την ενέργεια των ενεργειακών ταλαντώσεων που τα δημιουργήσαν. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποκτηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που διαπερνά το φράγμα δυναμικού στο φαινόμενο σήραγγος ισοδυναμεί με το φορτίο του ηλεκτρονίου επί την διαφορά δυναμικού κατά μήκος του φράγματος (δηλαδή την τοπική πτώση τάσης μεταξύ των δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων). Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, η πτώση τάσης στις μικροδομές που άγουν, έχει την ίδια τιμή με την συνολική πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών όταν παρατηρούνται τα μη γραμμικά φαινόμενα και κατά την διάρκεια λειτουργίας της επαφής τα παραγόμενα φωτόνια έχουν μέση ενέργεια η οποία αντιστοιχεί στην υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτό συνεπάγεται φαινόμενα αυτοθέρμανσης (self heating) κατά την λειτουργία των επαφών. Πτώση τάσης μεγαλύτερη από αυτή που προαναφέρθηκε (σε περιπτώσεις λειτουργίας της επαφής εκτός των προδιαγραφών) συνεπάγεται κατά τη βιβλιογραφία εκπομπή ακτινοβολίας που επεκτείνεται μέχρι τις υπεριώδεις ακτίνες. Γενικά κάθε απόκλιση από τη γραμμικότητα έχει αποδοθεί στην επαύξηση του πεδίου και στην παράλληλη παρουσία των μικροδομών MIM, MOM και MGM οι οποίες μπορούν να καταστούν αγώγιμες πέραν της κατωφλικής πεδριακής τιμής, διαμορφώνοντας την ενεργό διατομή της επαφής, AC, ανάλογα με την τοπική πεδριακή ένταση. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται και φαινόμενα διαφοράς φάσεως τα οποία οφείλονται στην χωρητική φύση των μικροδομών που ενεργοποιήθηκαν.

Ειδικότερα η συμπεριφορά μιας μικροδομής MIM η οποία άγει πέρα από ένα κατώφλι εφαρμοζόμενου πεδίου, μπορεί να γίνει κατανοητή με την μελέτη του ενεργειακού διαγράμματος των επαπτόμενων περιοχών κατά τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Συμμετρική μικροδομή MIM κάτω από μηδενική διαφορά δυναμικού (σχήμα 4.2.2-2α). Το σύστημα δεν άγει λόγω του μεγάλου πάχους s (σχήμα 4.2.2-2b).
- Εφαρμογή μέτριας τιμής πεδίου. Το σύστημα δεν άγει ακόμα λόγω του μεγάλου πάχους s (σχήμα 4.2.2-2c).
- Εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονωτική ικανότητα (πάχος s) μεταξύ των ηλεκτροδίων έχει μειωθεί και η μικροδομή άγει (σχήμα 4.2.2-2c).



Σχήμα 4.2.2-2: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού. Το πάχος s δεν επιτρέπει το φαινόμενο σήραγγος για μικρή διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια:

- (α) $U=0$. Η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Η επαφή δεν άγει.
- (β) $0 < U < \phi_0$. Δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού για την εκδήλωση του φαινομένου.
- Τυχόν ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.
- (γ) $\phi_0 < U$. Η επαφή άγει δια του φαινομένου σήραγγος διότι το πάχος s έχει μειωθεί σε ds .

Η κλασική μαθηματική προσέγγιση για μία μεμονωμένη δομή MIM εξετάζει την πυκνότητα του ρεύματος σήραγγος μέσα από ένα φράγμα δυναμικού με κλασσικά όρια x_1, x_2 κατά μήκος του άξονα των x . Η πυκνότητα ρεύματος J για δύο αγωγίμες περιοχές (ηλεκτρόδια) που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φράγμα δυναμικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, η οποία ισχύει για 0°K :

$$J = J_o [\Phi \exp(-A\sqrt{\Phi}) - (\Phi + U) \exp(-A\sqrt{\Phi + U})] \quad (4.2.2-1)$$

Όπου:

- $J_o = \frac{q^2}{2\pi h (d s^2)}$
- $A = \frac{4\pi \cdot ds \sqrt{2mq}}{h}$
- h : η σταθερά του Planck

Οι παράγοντες οι οποίοι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πλάτος του φράγματος δυναμικού $ds = x_2 - x_1$, το μέσο ύψος του φράγματος πάνω από την στάθμη Fermi ϕ , και ο τρόπος που τα παραπάνω μεγέθη αλλάζουν με την επιβολή ηλεκτρικού πεδίου. Στην περίπτωση που η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική το σχετικά μεγάλο πάχος των επικαθίσεων απαγορεύει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος.

Για μια πτώση τάσης μέσου μεγέθους κατά μήκος του φράγματος (διεύθυνση x) ισχύει (σχήμα 4.1.9-2b):

$$0 < U < \Phi_0 \quad (4.2.2-2)$$

Εξακολουθούν να ισχύουν οι απαγορευτικές συνθήκες καθώς το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού έχει μειωθεί ελάχιστα, σύμφωνα με την σχέση:

$$\phi = \Phi_o - \frac{U}{2} \quad (4.2.2-3)$$

Εάν υπάρξει ροή φορέων, αυτή έχει αποδοθεί μόνο σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού.

Όταν η διαφορά δυναμικού έχει πλέον αυξηθεί περισσότερο και ικανοποιείται η σχέση (σχήμα 4.1.9-2c):

$$U \geq \Phi_o \quad (4.2.2-4)$$

Τότε το μέσο ύψος του φράγματος δυναμικού ισούται με:

$$\phi \leq \frac{\Phi_o}{2} \quad (4.2.2-5)$$

και το πλάτος του:

$$ds = s \cdot \frac{\Phi_o}{U} \quad (4.2.2-6)$$

Συμπερασματικά, όταν το φράγμα δυναμικού γίνει αρκετά λεπτό ώστε να επιτρέπει την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος η αντίσταση που αντιμετωπίζουν τα ηλεκτρόνια μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους με αποτέλεσμα το ρεύμα να αυξάνεται δραστικά. Τελικά, η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος θα φτάσει την τιμή:

$$U > \Phi_o + \frac{E_F}{q} \quad (4.2.2-7)$$

όπου E_F είναι η ενέργεια Fermi.

Η σχέση (4.2.2-7) τείνει στη σχέση που προτάθηκε από τους Fowler-Nordheim. Πρόσφατα αποδείχθηκε ότι στις μικροδομές MOM η πτώση τάσης κατά μήκος του φράγματος δυναμικού χαρακτηρίζει το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός όταν η επαφή άγει.

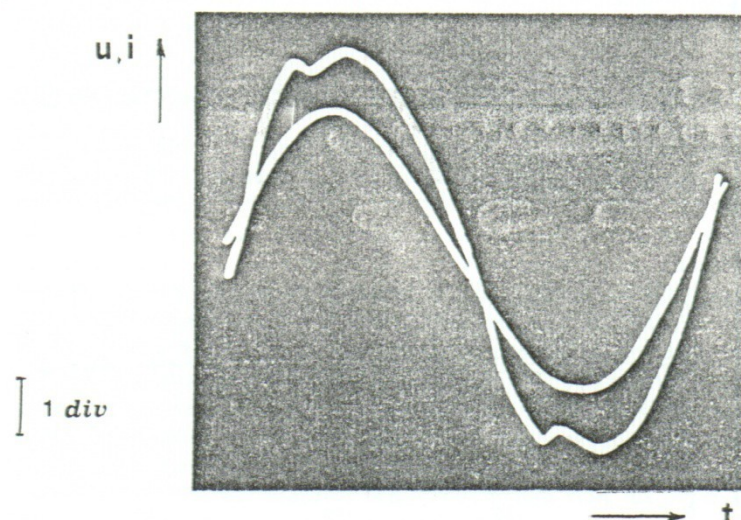
Μία ηλεκτρική επαφή παρουσιάζει περιοχές (spots) στις οποίες η αγωγή ρεύματος γίνεται δια του φαινομένου σήραγγος και οι οποίες είναι τυχαία κατανομημένες στη φαινόμενη επιφάνεια της επαφής. Οι μικροδομές MIM δημιουργούνται από τις επικαθίσεις στην μεταλλική επιφάνεια, οι οποίες επιφέρουν φράγματα δυναμικού ποικίλου πάχους και ύψους. Τη θεωρητική διερεύνηση της επίδρασης του ανομοιομορφου πάχους των διηλεκτρικών στρωμάτων των επαφών σχετικά με την

πυκνότητα του ρεύματος δια μέσου περιοχών που άγουν κατά το φαινόμενο σήραγγος, καθώς και άλλων περιοχών που παρουσιάζουν χωρητικότητα, ανέλαβε ο Hurysch [12,13,17,18].

4.2.3 Ηλεκτρομονωτική και αγώγιμη συμπεριφορά των μικροδομών μίας στατικής ηλεκτρικής επαφής

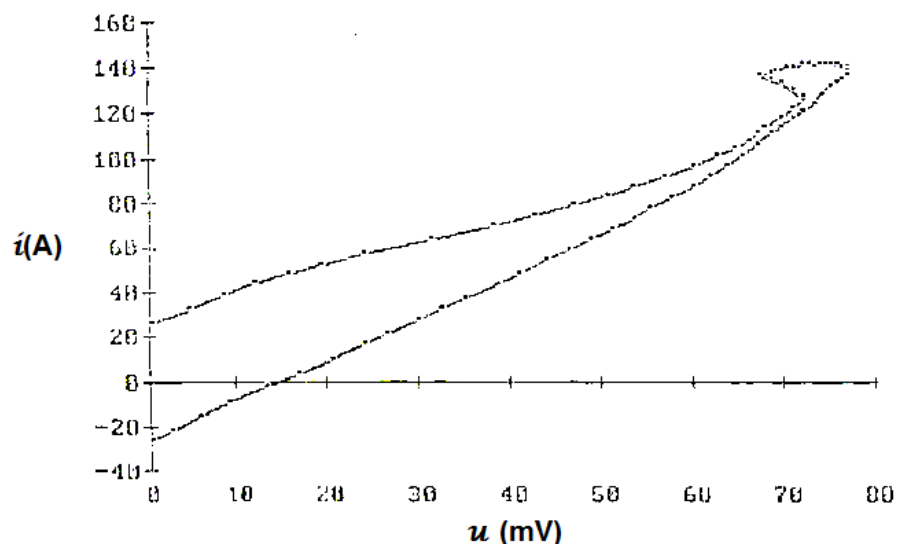
Η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου των μικροδομών μπορεί να μελετηθεί συστηματικά εξετάζοντας διαγράμματα ρεύματος-τάσης. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε καταγράφοντας τις χαρακτηριστικές χρόνου $u(t)$ και $i(t)$ σε επαφές διακοπτών. Η απαλοιφή του χρόνου από τα προηγούμενα σήματα για μια περίοδο μπορεί να μας οδηγήσει σε ένα διάγραμμα ρεύματος-τάσης ($i-u$). Το παλμογράφημα του σχήματος (4.2.3-1) αναφέρεται σε συνθήκες λειτουργίας με μη γραμμική συμπεριφορά επαφών. Μια σύγκρισή με τα παλμογραφήματα επαφών που παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η διαφορά φάσεως μπορεί να αποδοθεί στην χωρητική σύζευξη των διαφόρων μικροδομών MIM, MOM, και MOM οι οποίες ενεργοποιήθηκαν από το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο.
- Οι μη γραμμικές χαρακτηριστικές $i-u$, σε επαφές διακοπτών υπο υψηλό ηλεκτρικό πεδίο, μπορούν να αποδοθούν στην εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος, σε φαινόμενα νηματοειδούς κατανομής ρεύματος και στην ανάπτυξη διστάθειας κάτω από συνθήκες έντονης αυτοθέρμανσης.



Σχήμα 4.2.3-1: Παλμογράφημα τάσης-ρεύμας στις επαφές αποζεύκτη 500V/100A με επάργυρεςεπαφές από χαλκό σε λειτουργία ονομαστικού ρεύματος 100A. Κλίμακα τάσης 20mV/div, ρεύματος 60A/div, χρόνου 2ms/div.

Τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στο σχήμα (4.2.3-1) οφείλονται σε μεταφορά φορέων(π.χ. φαινόμενο σήραγγος). Από την καμπύλη $i-u$ του σχήματος (4.2.3-2) θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή η δράση της διστάθειας στις επαφές που λειτουργούν κάτω από συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων. Εκτιμάται ότι ο ρυθμός έγχυσης φορτίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερος των 100 Cb/mm^2 . Το μέγεθος αυτό προκύπτει χρησιμοποιώντας τυπική τιμή ρεύματος 100 A και συνολικό εμβαδόν φαινόμενης επιφάνειας (A_a) ίσο προς 1mm^2 . Στην πράξη οι ρυθμοί έγχυσης είναι πολύ μεγαλύτεροι επειδή η ενεργός επιφάνεια είναι μικρότερη κατά μία τάξη μεγέθους.



Σχήμα 4.2.3-2: Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης του παραπάνω παλμογραφήματος για μία ημιπερίοδο λειτουργίας.

Με αιτία την χωρητική φύση τους, οι επαφές εμφανίζονται να έχουν αξιόλογη ροή ρεύματος υπό μηδενική τάση όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα (4.2.3-2). Για τον ίδιο λόγο στην χαρακτηριστική $i-u$, τα φαινόμενα μη γραμμικής συμπεριφοράς δεν φαίνεται να αντιστρέφονται στον κλάδο του κατερχόμενου βρόχου πριν το σημείο μηδενικής τάσης. Από πειραματικά δεδομένα η παραπάνω επαφή σε χαμηλές τιμές τάσης παρουσιάζει καθαρά ωμική συμπεριφορά και πέρα από μία οριακή τιμή τάσης, η ανάπτυξη της διστάθειας επιφέρει φαινόμενα υστέρησης.

Συνθήκες για να εμφανιστεί διστάθεια συναντώνται στην πράξη όσον αφορά τα μέταλλα σε όλες τις περιπτώσεις αλλαγής φάσης από μία κατάσταση υψηλής αγωγιμότητας σε κατάσταση χαμηλής αγωγιμότητας. Παραδείγματα είναι η υπεραγωγιμότητα, η τήξη και η εξάχνωση. Συστήματα με πολλαπλά σημεία ευστάθειας έχουν δυνατότητα να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά όπως για παράδειγμα φαινόμενα υστέρησης, αρνητική διαφορική αντίσταση (NDR), άλματα δυναμικού [12,15,17].

4.2.4 Σπινθηρισμοί και τήγματα μετάλλου σε ακατάλληλες ηλεκτρικές επαφές

Σε περίπτωση κακών ηλεκτρικών επαφών, δηλαδή επαφών με μεγάλη αντίσταση διάβασης - λόγω π.χ. δημιουργίας μεγάλου ποσοστού οξειδίων στο διακόπτη ή χαλάρωση σύσφιξης των δύο μερών της επαφής- αυξάνεται η πτώση τάσης στην επαφή με αποτέλεσμα την πιθανότητα εκδήλωσης σπινθηρισμών μέχρι και δημιουργίας τηγμάτων μετάλλου από τα υλικά του λυόμενου συνδέσμου. Η εξ αποστάσεως μέτρηση της θερμοκρασίας των επαφών αυτών που γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς σε ετήσια βάση στις γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί μίας ικανοποιητική μέθοδο για την αξιόπιστη λειτουργία τους [13,17].

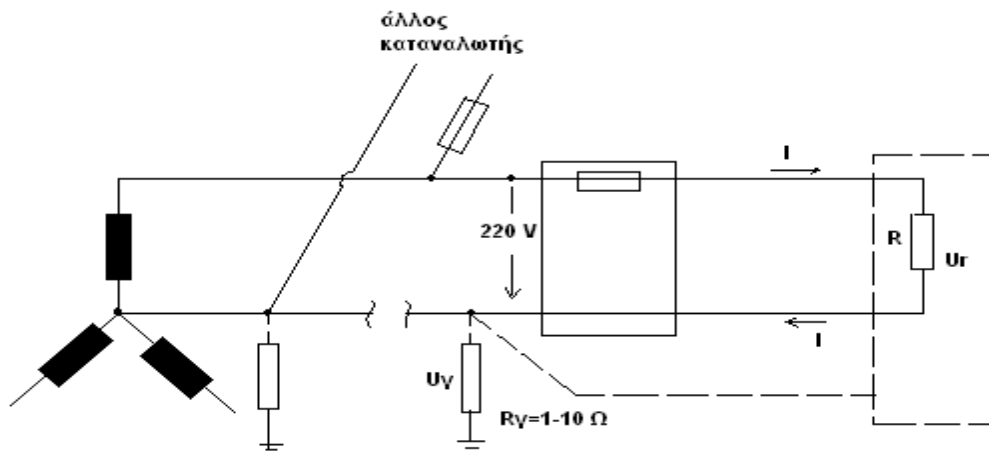
4.2.5 Ασυνέχεια λόγω οξείδωσης στο διακόπτη ουδετέρου σε πίνακα χαμηλής τάσης

Οι εναέριες γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης μελετώνται και κατασκευάζονται με αυστηρούς κανονισμούς τόσο στην Ελλάδα όσο και στις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε να μην αναιρούνται η μηχανική, η ηλεκτρική και η διηλεκτρική αντοχή από ετήσια σε ετήσια επιθεώρηση. Στην ετήσια επιθεώρηση που διενεργείται γίνονται μετρήσεις σε σημεία σύνδεσης των αγωγών και γενικά σε στατικές ηλεκτρικές επαφές, από όπου διαπιστώνεται αν υπάρχει πρόβλημα μεγάλων αντιστάσεων διάβασης.

Σε περίπτωση οξείδωσης ενός συνδέσμου, η θερμοκρασία είναι αυξημένη και τότε ο λυόμενος ηλεκτρικός σύνδεσμος έχει μεγάλη αντίσταση και ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα λειτουργίας λόγω κακών επαφών ή λιώσιμο των επαφών.

Σε αυξημένη οξείδωση του διακόπτη ουδετέρου στον πίνακα χαμηλής τάσης λόγω της μεγάλης αντίστασης των οξειδίων εμφανίζεται ασυνέχεια του ουδετέρου. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Αποκοπή ουδετέρου με γείωσή του στους καταναλωτές



Σχήμα 4.2.5-1: Αποκοπή ουδετέρου με γείωση προ του μετρητή του καταναλωτή

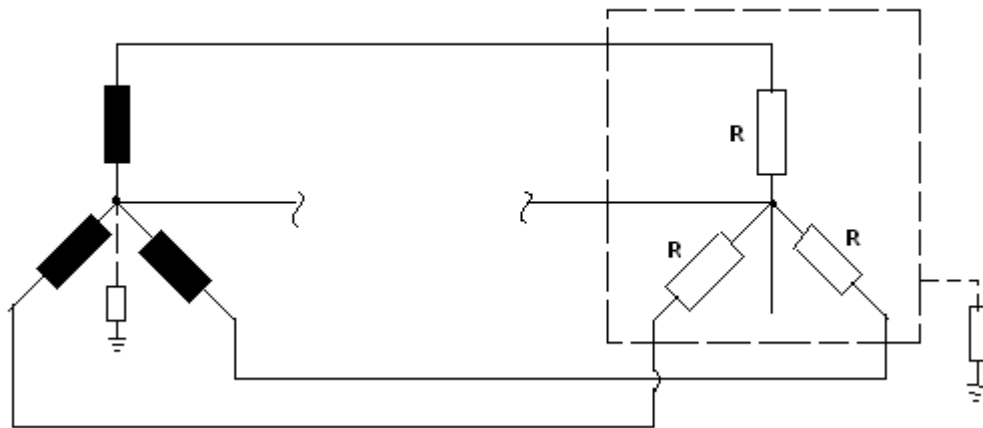
Παρατηρείται ότι ο ουδέτερος αγωγός είναι γειωμένος πριν το μονοφασικό καταναλωτή. Σε περίπτωση ασυνέχειας του ουδετέρου προκαλείται διαρροή ρεύματος προς γη που σημειώνεται στο σχήμα (4.2.5-1). Το κύκλωμα δηλαδή συνεχίζει να λειτουργεί μέσω γης, υπάρχει καταμερισμός τάσης.

$$I = \frac{230}{R + R_\gamma} \Rightarrow U_R = I \cdot R \quad \text{και} \quad U_\gamma = I \cdot R_\gamma$$

Είναι:

Η τάση U_γ θα είναι επικίνδυνη για τον άνθρωπο αν η τιμή της είναι μεγαλύτερη των 50 V [19].

- Αποκοπή ουδετέρου χωρίς γείωσή του στους καταναλωτές (γείωση στο M/Σ)



Σχήμα 4.2.5-2: Αποκοπή ουδετέρου χωρίς γείωσή του στους καταναλωτές (γείωση στο M/Σ).

Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2.5-2), δεν υπάρχει σε αυτή την περίπτωση γείωση του ουδετέρου αγωγού προς τους καταναλωτές. Σε περίπτωση αποκοπής του δημιουργείται εν σειρά σύνδεση φορτίων. Τα φορτία αυτά είναι ηλεκτρικές συσκευές και η σύνδεσή τους σε σειρά μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή τους εξ' αιτίας των διαφορετικών ονομαστικών ρευμάτων τους [19].

Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.Δ., “Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998.
- [2] Περικλής Δ. Μπούρκας, Γεώργιος Α. Βίλλιας, Αθανάσιος Χ. Μέρμιγκας, Ελευθερία Χ. Πυργιώτη, “Θερμική συμπεριφορά γραμμών κορμού διανομής μέσης τάσης κατά το βραχυκύκλωμα στον αέρα”
- [3] Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης, Φώτιος Α. Σουρτζής, “Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων”, διπλωματική εργασία
- [4] Μπούρκας Π.Δ., Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος, “Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [5] Μπούρκας Π.Δ., “Ασκήσεις Κτηριακών-Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων (Υποσταθμός Μέσης Τάσης, Βραχυκυκλώματα-Γειώσεις)”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- [6] Ιωάννη Θ. Αραβανή, Θεοφάνη Ι. Αραβανή και Τρύφωνα - Χρυσοβαλάντη Ι. Αραβανή, άρθρο: “Μονωτήρες δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας”.
- [7] L.L.Alston, S. Zoledziowski, “Growth of discharges on polluted insulation”, proc. IEE vol.110, No.7, July 1963.
- [8] R. Wilkins, “Flashover Voltage of High Voltage insulators with uniform surface pollution films”, proc. IEE vol.116, No. 3, March 1969.
- [9] Κ. Καραγκάκης, “Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
- [10] J.S.T. Looms, “Insulators for Hight Voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.
- [11] Ι.Α. Σταθόπουλος, “Υψηλές τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1997.

- [12] Κυριάκος Ν. Βασιλάκης , “Διερεύνηση της επίδρασης της ροπής σύσφιξης στην αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων” , διπλωματική εργασία
- [13] HOLM R. “Electric contacts theory and applications” ,4th ed. Springer Verlag, Berlin, 1979.
- [14] Karagiannopoulos CG., Bourkas P.D., Dervos C. “Measurements on contacts of no load switches using differnt currents and clamping spring force values. International Symposium on Applied Modeling ans Simulation” , (18-20 June 1990), 94-97.
- [15] ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ.Γ. “Μη γραμμικά φαινόμενα σε στατικές ηλεκτρικές επαφές” , διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών h Μηχανικών Υπολογιστών, 1992.
- [16] Bourkas Π.Δ., ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Κ.Γ., “Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά” , Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
- [17] Ελευθέριος Γ. Ψαρρός, “Υπαίθριες Γραμμές Διανομής Χαμηλής Τάσης σε Περιβάλλον Πυρκαγιών” , διδακτορική διατριβή ,Αθήνα 2009.
- [18] C G Karagiannopoulos, C S Psomopoulos and P D Bourkas “ A theoretic and experimental investigation in stationary electric contacts” , Αθήνα 2001.
- [19] Γεωργάκη Ε.Ουρανία, “Αποκοπή αγωγού αλουμινίου ισοδυναμικής διατομής 16mm² γραμμής διανομής χαμηλής τάσης (400V, 230V) ηλεκτροδοτούμενης από υπαίθριο υποσταθμό μέσης τάσης 150kVA ή 160kVA ή 200kVA” ,διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009.