



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

Βιβλιογραφική ανασκόπηση
σχετικά με την Πυροπροστασία των Μετασχηματιστών

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Σ. Δαρζέντας

Επιβλέπων: Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009



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

Βιβλιογραφική ανασκόπηση
σχετικά με την Πυροπροστασία των Μετασχηματιστών

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Σ. Δαρζέντας

Επιβλέπων: Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Σεπτεμβρίου 2009.

.....
Π. Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

.....

Νικόλαος Σ. Δαρζέντας

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

Copyright © Νικόλαος Σ. Δαρζέντας 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η καταπολέμηση των πυρκαγιών των μετασχηματιστών είναι ένα πολύπλοκο εγχείρημα. Εμφανίζονται πολλές δυσκολίες και προβλήματα στην περίπτωση της πυρκαγιάς ενός μετασχηματιστή, τόσο για το μετασχηματιστή, ως συσκευή στο ηλεκτρικό δίκτυο, όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος εξοπλισμού, αλλά και για την προστασία της ζωής των ατόμων που εργάζονται σε χώρους που συμπεριλαμβάνονται μετασχηματιστές. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι η συλλογή επιστημονικών απόψεων πάνω στο αντικείμενο της προστασίας του μετασχηματιστή, με μεγαλύτερη έμφαση στην πυροπροστασία του μετασχηματιστή. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ειδών της πυρκαγιάς, της πυροπροστασίας και των βασικών εννοιών σχετιζόμενων με την πυροπροστασία, αναλύονται οι θεωρίες σχετικά με τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές και τη διάσπασή τους, δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη μακροσκοπική και τη κβαντομηχανική θεώρηση, ενώ ακόμη αναφέρονται γενικές μέθοδοι για την ψύξη του μετασχηματιστή, καθώς και μέθοδοι συντήρησης του μονωτικού ελαίου του μετασχηματιστή. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται ο σκοπός της εργασίας. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης σχετικά με την πυροπροστασία του μετασχηματιστή. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σχόλια και τα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά

πυροπροστασία, πυρανίχνευση, μετασχηματιστής, προστασία, μόνωση, μονωτικό έλαιο

Abstract

The fighting of fires of transformers is a complicated operation. There are a lot of difficulties and problems in case of a fire of a transformer, for the transformer, as appliance in the electric network and the protection of ambient equipment, as well as for the protection of life of individuals that work in spaces where are included transformers. Aim of this diploma thesis, is the collection of scientific researches about the object of the protection of a transformer, with emphasis in the fire security of the transformer. In the first chapter there is a presentation of the types of fire, fire security and definitions related with the fire security, there is an analysis of the theories of the insulating materials that are used in the transformers and their failure. Also, the equivalent circuit of the transformer is given, according to the macroscopic and quantum theory and there is a report in general methods for the refrigeration of transformer, as well as methods of maintenance of the insulating oil of the transformer. In the second chapter the aim of the thesis is given. In the third chapter the discoveries of literature are presented, with regard to the fire security of the transformer. Finally, in the fourth chapter, the comments and the conclusions are presented.

Key words

fire security, fire detection, transformer, protection, insulation, oil insulation

Ευχαριστίες

Αυτή η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Βιομηχανικών Διατάξεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του κ. Περικλή Μπούρκα, Καθηγητή Ε.Μ.Π.

Αφορά στην βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα της πυροπροστασίας των μετασχηματιστών.

Οφείλω τις ευχαριστίες μου:

Στον κ. Περικλή Μπούρκα, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τις προσπάθειες που καταβάλλει για να μεταδώσει τις γνώσεις του και τη νοοτροπία του Μηχανικού προς τους φοιτητές του.

Στην κ. Αικατερίνη Πολυκράτη, Διδάκτορα Μηχανικό, Ε.Ε.ΔΙ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθώς και για τις καθοριστικής σημασίας υποδείξεις και συμβουλές της.

Αφιερωμένο
στον πατέρα μου Στέφανο,
στη μητέρα μου Χαραλαμπία
και στην αδερφή μου Ευαγγελία.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Λέξεις κλειδιά	5
Abstract.....	6
Key words.....	6
Πίνακας Περιεχομένων	11
1. Εισαγωγή.....	15
1.1 Είδη Πυρκαγιάς και Είδη Πυροπροστασίας.....	16
1.1.1 Το Τρίγωνο της Πυρκαγιάς.....	16
1.1.2 Διάδοση της Θερμότητας.....	17
1.1.3 Αιτίες Πυρκαγιών	17
1.1.4 Τρόποι κατάσβεσης πυρκαγιών	18
1.1.4.1 Αφαίρεση της καύσιμης ύλης.....	18
1.1.4.2 Αφαίρεση της θερμότητας (υποβιβασμός θερμοκρασίας)	19
1.1.4.3 Αποστέρωση του οξυγόνου (αποπνιγμός ή απομόνωση).....	19
1.1.4.4 Κατάσβεση με άλλους τρόπους.....	19
1.1.5 Μέσα κατάσβεσης	20
1.1.5.1 Νερό (H ₂ O).....	20
1.1.5.2 Αφρός	20
1.1.5.3 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂).....	21
1.1.5.4 Αλογονομένοι υδρογονάνθρακες (HALON 1301 ή 1211)	21
1.1.5.5 Νέα κατασβεστικά υλικά – Υποκατάστατα Halon	21
1.1.5.6 Ξηρά σκόνη	23
1.1.5.7 Άμμος, χώμα, σκεπάσματα, κ.α.....	23
1.1.6 Κατηγορίες πυρκαγιών	23
1.1.7 Κατηγορίες Πυροπροστασίας.....	23
1.1.7.1 Παθητική Πυροπροστασία	24
1.1.7.2 Ενεργητική Πυροπροστασία.....	24
1.2 Βασικές Έννοιες	26
1.3 Μονωτικά Υλικά	29
1.3.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών	29
1.3.1.1 Αέρια Μονωτικά Υλικά.....	29
1.3.1.2 Υγρά Μονωτικά Υλικά	31
1.3.1.3 Στερεά Μονωτικά Υλικά	32
1.3.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών μονωτικών υλικών	33
1.3.2.1 Η θερμική διάτρηση.....	33
1.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση	33
1.3.2.3 Τεχνητή Γήρανση	35

1.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση	35
1.3.2.5 Μηχανική Αντοχή	36
1.3.3 Διάσπαση των αέριων μονωτικών	36
1.3.4 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά	38
1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή	40
1.4.1 Μακροσκοπική Θεώρηση	40
1.4.1.1 Θερμική Διάτρηση και Μετασχηματιστής	40
1.4.1.2 Ηλεκτρική Διάτρηση και Μετασχηματιστής	41
1.4.1.3 Διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων. Ηλεκτροχημική διάτρηση ή γήρανση της μόνωσης και Μετασχηματιστής	41
1.4.1.4 Θερμοχημική Διάτρηση και Μετασχηματιστής	42
1.4.2 Κβαντομηχανική θεώρηση	44
1.5 Ψύξη Μετασχηματιστών.....	47
1.6 Το μονωτικό λάδι των μετασχηματιστών	50
1.6.1 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών	51
2. Σκοπός της Εργασίας	53
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	55
3.1 Συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις εντολών, επικοινωνιών, υπολογιστών, πληροφοριών, παρακολούθησης και αναγνώρισης: πυροπροστασία.....	56
3.1.1 Γενικά συστήματα πυροπροστασίας	57
3.1.2 Συστήματα πυρανίχνευσης	57
3.1.2.1 Τύποι ανιχνευτών	57
3.1.2.2 Συστήματα σηματοδότησης	58
3.1.3 Συστήματα καταστολής πυρκαγιάς	59
3.1.3.1 Συστήματα νερού	59
3.1.3.2 Διοξείδιο του άνθρακα.....	60
3.1.3.3 Πυροσβεστικά συστήματα αφρού.....	61
3.1.3.4 Φορητοί πυροσβεστήρες	61
3.2 Μηχανολογικός σχεδιασμός υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας: συστήματα πυροπροστασίας μετασχηματιστών και πυρανίχνευση ...	62
3.2.1 Πυροπροστασία μετασχηματιστών	63
3.2.1.1 Υπαίθριοι – εσωτερικοί μετασχηματιστές	63
3.2.1.2 Εξωτερικός μετασχηματιστής ελαίου	63
3.2.2 Ανιχνεύσεις.....	63
3.3 Πυρίμαχα ρευστά για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές	65
3.3.1 Askarels	66
3.3.2 Παραδοσιακές εναλλακτικές.....	66

3.3.3 Νέες εμπορικές εναλλακτικές	68
3.3.4 Εξελισσόμενες λύσεις	70
3.3.5 Συμπεράσματα της δημοσίευσης.....	71
3.4 Ανάπτυξη ενός Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου και σχεδιασμός ενός συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, Σ.Α.Τ.Υ.Φ. και δοχείου μονωτικού ελαίου	72
3.4.1 Στοιχεία βάσης δεδομένων	73
3.4.2 Αποδοτικότητα μηχανικής προστασίας.....	73
3.4.3 Αποτυχίες συστήματος εξάλειψης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες νερού	74
3.4.4 Αποτελέσματα της ανάλυσης της βάσης δεδομένων	74
3.4.5 Η ανάλυση του φαινομένου βραχυκυκλώματος μέσα σε έναν μετασχηματιστή	74
3.4.6 Τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν για λάδι σιλικόνης.....	78
3.4.7 Μέθοδος για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς.....	78
3.4.8 Σύστημα πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, SERGI, τύπος 4000	79
3.4.9 Συμπεράσματα της δημοσίευσης.....	81
3.5 Σύστημα πρόληψης και εξάλειψης πυρκαγιάς για Μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30MVA, 110kV/27kV στο προαστιακό τμήμα του Mumbai.....	82
3.5.1 Μειονεκτήματα έκρηξης μετασχηματιστή και πυρκαγιάς υποσταθμού ..	83
3.5.2 Λόγοι έκρηξης μετασχηματιστών	83
3.5.3 Όρια Ηλεκτρικής και Μηχανικής Προστασίας Μετασχηματιστών	84
3.5.4 Γεγονότα στην έκρηξη και την πυρκαγιά σε μετασχηματιστές	84
3.5.5 Σύστημα Πυροπροστασίας – Ανακουφιστική Διάταξη Πίεσης.....	86
3.5.6 Αέρια δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της ρήξης της μόνωσης πριν το ηλεκτρικό τόξο μέσα στο κιβώτιο	86
3.5.7 Σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες αζώτου	87
3.5.8 Λειτουργικός Έλεγχος	88
3.5.8.1 Αυτόματος έλεγχος	88
3.5.8.2 Απομακρυσμένος Χειροκίνητος Έλεγχος	89
3.5.8.3 Τοπικός Χειροκίνητος Έλεγχος.....	89
3.5.9 Λεπτομέρειες του Εξοπλισμού του Συστήματος Πυροπροστασίας.....	89
3.5.10 Πλεονεκτήματα του συστήματος	91
3.5.11 Σύγκριση με παραδοσιακά συστήματα εξάλειψης πυρκαγιάς	91
3.5.12 Συμπεράσματα της δημοσίευσης.....	91
3.6 Πυροπροστασία Μετασχηματιστών Ισχύος με Σύστημα Συμπιεσμένου Αέρα – Αφρού	93
3.6.1 Πυροπροστασία μετασχηματιστών με σύστημα ψεκαστήρων με νερό, σύστημα αφρού απορρόφησης αέρα	94
3.6.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασία.....	95

3.6.2.1 Εγκατάσταση Δοκιμαστικού Μετασχηματιστή Ισχύος	95
3.6.2.2 Διατάξεις ελέγχου	97
3.6.2.3 Δοκιμαστικά καύσιμα	97
3.6.2.4 Συστήματα Καταστολής	98
3.6.2.5 Διαδικασία Δοκιμής	99
3.6.3 Αποτελέσματα και σχόλια.....	99
3.6.4 Συμπεράσματα της δημοσίευσης.....	103
3.7 Εκτίμηση κινδύνου πυροπροστασίας μετασχηματιστή σε ένα τυπικό πολυώροφο κτίριο της Νέας Ζηλανδίας	104
3.7.1 Μετασχηματιστές: ταξινόμηση και κίνδυνος πυρκαγιάς.....	105
3.7.2 Στόχος της έρευνας	107
3.7.3 Κύριες συνιστώσες μετασχηματιστών.....	107
3.7.4 Τύποι μετασχηματιστών και μονωτικά	109
3.7.5 Ανάλυση σφαλμάτων μετασχηματιστή	111
3.7.6 Ηλεκτρική Προστασία	111
3.7.7 Συστήματα πυροπροστασίας	112
3.7.8 Σύστημα ανίχνευσης καπνού	112
3.7.9 Αυτόματα συστήματα καταστολής.....	113
3.7.10 Ανάλυση σφάλματος για την πυρκαγιά μετασχηματιστή	115
3.7.11 Ανάλυση σεναρίων	117
3.7.12 Συμπεράσματα κατόπιν προσομοίωσης και ανάλυσης στατιστικών δεδομένων της δημοσίευσης	119
4. Συμπεράσματα επί της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και σχόλια επί των εργασιών.....	121
Βιβλιογραφία	125

1. Εισαγωγή

Στην αρχή αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα είδη της πυρκαγιάς και της πυροπροστασίας, καθώς και κάποιοι ορισμοί χρήσιμοι για την κατανόηση των όσων αναφέρονται στο κείμενο παρακάτω.

Εν συνεχεία, αναλύονται οι θεωρίες σχετικά με τα μονωτικά υλικά, αέρια, υγρά και στερεά, τα οποία χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές, καθώς και τα φαινόμενα διάσπασης αυτών.

Ακολούθως, δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεώρηση, η οποία λαμβάνει υπόψη τις θεωρητικές μορφές διάτρησης, καθώς και τη κβαντομηχανική θεώρηση για τη γήρανση και τη διάσπαση των μονωτικών.

Τέλος, αναφέρονται γενικές μέθοδοι για την ψύξη του μετασχηματιστή, καθώς και μέθοδοι συντήρησης του μονωτικού ελαίου του μετασχηματιστή, μιας και είναι το συνηθέστερο μονωτικό υλικό μετασχηματιστή.

1.1 Είδη Πυρκαγιάς και Είδη Πυροπροστασίας

1.1.1 Το Τρίγωνο της Πυρκαγιάς

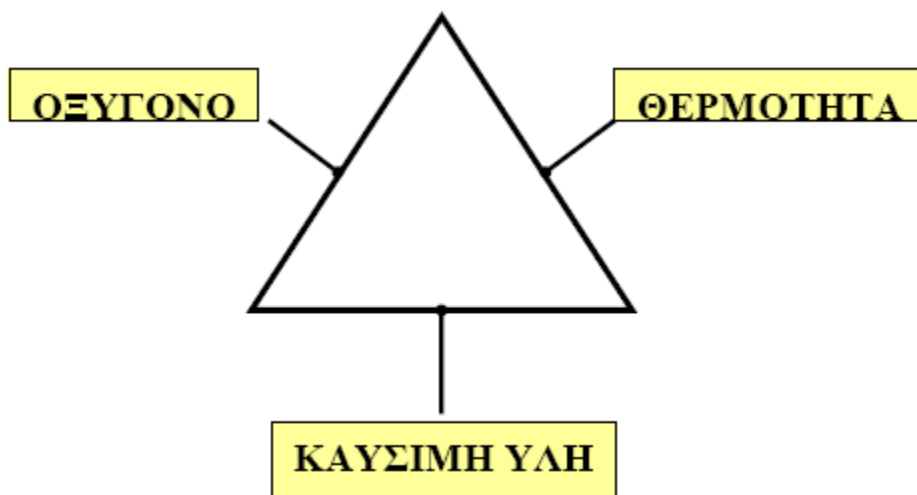
Καύση είναι η χημική ένωση μιας ουσίας με το οξυγόνο ή με άλλο αέριο που συνοδεύεται συνήθως από έκλυση (παραγωγή) θερμότητας, συνήθως δε και φωτός.

Πυρκαγιά είναι η ανεξέλεγκτη καύση με το οξυγόνο, η οποία συνοδεύεται από έκλυση μεγάλων ποσών θερμότητας και φωτός, συνέπεια δε έχει την ζημιογόνα καταστροφή του καίόμενου υλικού.

Για να γίνει μία καύση όπως και μία πυρκαγιά, πρέπει να συνυπάρχουν τρεις παράγοντες:

- καύσιμη ύλη
- αέρας (οξυγόνο)
- θερμότητα (για την ανάφλεξη)

Μπορούν να παρασταθούν με τρεις πλευρές ενός τριγώνου, του λεγομένου τριγώνου της πυρκαγιάς, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1.1-1: Το Τρίγωνο της Πυρκαγιάς, η οποία για να συντελεστεί, χρειάζεται την συνύπαρξη τριών παραγόντων (Οξυγόνο, Θερμότητα, Καύσιμη Ύλη)

Αν κάποιος από τους παράγοντες λείπει, δεν μπορεί να ξεκινήσει πυρκαγιά, ενώ σε περίπτωση πυρκαγιάς, αν αφαιρέσουμε κάποιον από τους τρεις παράγοντες, σταματάει αμέσως η πυρκαγιά. Όλες οι μέθοδοι κατάσβεσης βασίζονται σε αυτήν ακριβώς την παρατήρηση.

Όλα τα υλικά όταν βρεθούν σε κατάλληλες συνθήκες καίγονται. Πολλά όμως καίγονται σχετικά εύκολα και χαρακτηρίζονται σαν καύσιμα υλικά.

Αυτά χωρίζονται σε:

- Στερεά καύσιμα: Ξύλα, χόρτα, βαμβάκι, νήματα, υφάσματα, άνθρακες, πλαστικά, ελαστικά κ.α.
- Υγρά καύσιμα: Πετρέλαιο, βενζίνη, νέφτι, οινόπνευμα, έλαια, παραφίνη κ.α.
- Αέρια καύσιμα: Υδρογόνο, ασετιλίνη, φωταέριο, υγραέριο, προπάνιο, βουτάνιο, αιθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κ.α.

Με τον αέρα, εννοείται το οξυγόνο που περιέχεται στον αέρα (αναλογία 21% κατόγκο ή 23% κατά βάρος).

Όσον αφορά στη θερμότητα, τα στερεά και τα υγρά δεν αναφλέγονται παρά μόνο αν θερμανθούν, έτσι ώστε να εξέλθουν ατμοί από την μάζα τους, που πρέπει να φθάσουν σε θερμοκρασία ανάφλεξης και με την παρουσία οξυγόνου να αναφλεγούν και να καούν. Η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται από προσέγγιση γυμνής φλόγας, από σπινθήρα, από τις ηλιακές ακτίνες και άλλες αιτίες.

Εκτός από την παραπάνω περίπτωση, υπάρχει ανάφλεξη επειδή αυξάνεται η θερμοκρασία μέσα στην μάζα του ίδιου του σώματος. Αυτό λέγεται «αυτανάφλεξη» και παρατηρείται σε θημωνιές από νωπά χόρτα, σε συσσωρευμένα στουπιά ποτισμένα με λάδια, σε αποθηκευμένους σωρούς άνθρακα, σε βαμβάκι σε αμπάρια πλοίων κ.α.

1.1.2 Διάδοση της Θερμότητας

Η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας, που έχει σαν χαρακτηριστικό να μεταβιβάζεται από ένα σώμα με μεγαλύτερη θερμοκρασία, σε ένα σώμα με μικρότερη θερμοκρασία με τους εξής τρόπους:

- Με αγωγή: Γίνεται κυρίως στα στερεά σώματα, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από μόριο σε μόριο, από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σημείο, π.χ. θέρμανση μεταλλικής ράβδου.
- Με μεταφορά: Γίνεται συνήθως στα υγρά και στα αέρια, όπου η θερμότητα μεταφέρεται συνήθως με τα ρεύματα που δημιουργούνται λόγω θερμοκρασιακών διαφορών, π.χ. θέρμανση νερού, θέρμανση χώρων με το καλοριφέρ.
- Με ακτινοβολία: Γίνεται από σώμα σε σώμα χωρίς να παρεμβάλλεται κανένα υλικό (ούτε καν αέρας), π.χ. ηλεκτρική θερμάστρα, τζάκι, ακτίνες ήλιου κ.α.

1.1.3 Αιτίες Πυρκαγιών

Τα αίτια των πυρκαγιών έχουν ιδιαίτερη σημασία για πολλούς παράγοντες: την Πυροσβεστική Υπηρεσία, την οποία ενδιαφέρει η εξακρίβωση των αιτιών ώστε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα πρόληψης ή αντιμετώπισης, τους ιδιοκτήτες, διότι σε λίγα λεπτά μπορεί να εξαφανισθεί ολόκληρη περιουσία και ακόμα απειλείται η ζωή τους και η ζωή των συνανθρώπων τους, τις ασφαλιστικές

εταιρείες, οι οποίες καλούνται να καλύψουν ολόκληρο ή μέρος του ποσού που κοστίζει η απολεσθείσα περιουσία, την Εθνική Οικονομία, διότι καταστρέφονται παραχθέντα αγαθά και εξαφανίζονται κεφάλαια, αλλά και τη δικαιοσύνη, γιατί πρέπει να αναζητηθούν και να τιμωρηθούν οι τυχόν εμπρηστές ή οι εγκληματικώς αμελούντες.

Οι κυριότερες αιτίες από τις οποίες μπορούν να προκληθούν πυρκαγιές είναι:

- Οι γυμνές φλόγες (λυχνιών, κεριών, σπάρτων, αναπτήρων, εστιών πυρός κλπ.) ερχόμενες σε επαφή με καύσιμα υλικά.
- Ο ηλεκτρισμός (σπινθήρες, βραχυκύκλωμα).
- Αναμμένες θερμάστρες πετρελαίου, ξύλου ή μαγκάλια.
- Τα υπολείμματα καπνίσματος (αποτσιγάρα, πούρα κ.α.).
- Η τριβή, κρούση, πίεση.
- Φυσικά φαινόμενα (κεραυνός - σεισμός - ηφαίστεια).
- Οι ηλιακές ακτίνες που πέφτουν σε γυαλιά ή συγκεντρώνονται.
- Η αυτόματη ανάφλεξη (λόγω οξειδώσεως ή ζυμώσεως).
- Οι σπινθήρες ή η υπερθέρμανση που προέρχονται από την λειτουργία συσκευών ή μηχανημάτων (ατμομηχανών, λεβήτων, καυστήρων, κλιβάνων κ.α.).

Τέλος, τις πυρκαγιές, ανάλογα με την πρόθεση ή την υπαιτιότητα, τις κατατάσσουμε στις εξής κατηγορίες: από αμέλεια, από δόλο, τυχαίες και από ανωτέρα βία.

1.1.4 Τρόποι κατάσβεσης πυρκαγιών

Αναφέρθηκε ότι για να υπάρξει πυρκαγιά, πρέπει να συνυπάρχουν τρεις παράγοντες (καύσιμη ύλη, θερμότητα, αέρας). Αν λείψει και ένας μόνο παράγοντας, η πυρκαγιά δεν μπορεί να συνεχισθεί. Συνεπώς, η κατάσβεση μιας πυρκαγιάς μπορεί να γίνει κυρίως με τρεις τρόπους:

- Με την αφαίρεση της καύσιμης ύλης.
- Με την αφαίρεση της θερμότητας (δηλ. με τον υποβιβασμό της θερμοκρασίας του υλικού κάτω από το βαθμό αναφλέξεως).
- Με την αποστέρηση του οξυγόνου του αέρα.

1.1.4.1 Αφαίρεση της καύσιμης ύλης

Σε περίπτωση αερίων καυσίμων, π.χ. πυρκαγιά φωταερίου, κλείνει η δικλείδα της παροχής του καυσίμου, οπότε η φωτιά σβήνει.

Σε πετρελαιοδεξαμενές που καίγονται στην επιφάνεια ή που βρίσκονται πλησίον καιόμενων, απομακρύνεται το περιεχόμενο καύσιμο μέσω σωληνώσεων σε απομακρυσμένες δεξαμενές, οπότε πάλι η φωτιά θα σβήσει.

Οι πυρκαγιές δασών και χόρτων μπορούν να κατασβεσθούν με την τεχνική του «εμπρησμού ανακοπής». Η φωτιά θα σβήσει όταν φθάσει στην εμπρησθείσα περιοχή γιατί δεν θα υπάρχει καύσιμη ύλη.

Σε πυρκαγιές στερεών αντικειμένων απομακρύνονται τα παρακείμενα καύσιμα στερεά αντικείμενα σε ασφαλή περιοχή.

1.1.4.2 Αφαίρεση της θερμότητας (υποβιβασμός θερμοκρασίας)

Είναι γνωστό ότι για να γίνει πυρκαγιά, πρέπει τα υλικά να θερμανθούν, ώστε να φθάσουν στην θερμοκρασία ανάφλεξης, κάτω από την οποία δεν μπορούν να αναφλεγούν. Επομένως, κατεβάζοντας την θερμοκρασία ενός καιόμενου υλικού κάτω από το βαθμό ανάφλεξης, η πυρκαγιά σβήνει.

Το αντιπροσωπευτικότερο κατασβεστικό υλικό, που δρα ψύχοντας τα καιγόμενα υλικά, είναι το νερό, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη θερμοχωρητικότητα (μεγάλη απορρόφηση θερμότητας σε μικρό όγκο του).

1.1.4.3 Αποστέρωση του οξυγόνου (αποπνιγμός ή απομόνωση)

Το οξυγόνο, σαν απαραίτητο συστατικό για τις καύσεις, πρέπει να υπάρχει, ώστε να εκδηλώνεται και να συντηρείται η πυρκαγιά. Απαντάται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αν, με οποιοδήποτε τρόπο, επιτευχθεί η διακοπή της επαφής του καιόμενου σώματος με τον ατμοσφαιρικό αέρα, η πυρκαγιά σβήνει. Ο τρόπος αυτός ονομάζεται και «κατάσβεση με απομόνωση ή αποπνιγμό».

Η απομόνωση επιτυγχάνεται με την κάλυψη του καιγομένου υλικού με χώμα, άμμο, υγρά σκεπάσματα, αφρό, κατασβεστικές σκόνες, κατασβεστικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακα, HALON).

1.1.4.4 Κατάσβεση με άλλους τρόπους

Κατάσβεση πυρκαγιάς μπορεί να γίνει και με δύο ακόμα τρόπους:

- Κατάσβεση με διακοπή της φλόγας: Στα υγρά καύσιμα, αλλά και στα στερεά δεν καίγεται αυτή καθαυτή η μάζα τους, αλλά οι παραγόμενοι ατμοί. Ανάλογα δε με την ταχύτητα που παράγονται και διαφεύγουν από την μάζα οι ατμοί, οι φλόγες που προκαλούνται από την ανάφλεξή τους βρίσκονται σε μικρότερη ή μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια του υλικού. Το ίδιο συμβαίνει και με την ανάφλεξη διαφευγόντων αερίων, όπου οι φλόγες εμφανίζονται σε κάποια απόσταση από το στόμιο διαφυγής. Επομένως, αν με απότομη ενέργεια συμπαρασυρθούν και αποκοπούν οι φλόγες, η πυρκαγιά θα σβήσει, αλλά πρέπει η ενέργειά αυτή να είναι γρήγορη και καθολική, σε όλη την καιόμενη επιφάνεια, αλλιώς οι παραμένουσες φλόγες θα επανααναφλέξουν αμέσως τους ατμούς. Στην αρχή αυτή βασίζεται και η κατάσβεση πυρκαγιών σε πετρελαιοπηγές με έκρηξη βομβών στην επιφάνειά τους. Τα

δημιουργούμενα ωστικά κύματα παρασύρουν ταχύτατα τις φλόγες και έτσι σβήνει η πυρκαγιά.

- Διακοπή αλυσωτής αντίδρασης φλογών: Μία πυρκαγιά είναι χημική ένωση ουσιών με οξυγόνο. Οι ουσίες αυτές, λόγω της θέρμανσής τους, βρίσκονται σε ενεργό μορφή κατάλληλη για να αντιδράσουν με το οξυγόνο και λέγονται ρίζες. Αν με κάποιο τρόπο δεσμευτούν αυτά τα ενεργά στοιχεία και αδρανοποιηθούν, δεν θα μπορούν να αντιδράσουν με το οξυγόνο και θα σταματήσει η πυρκαγιά. Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με τους αλογονομένους υδρογονάνθρακες (HALONS), (οργανικές ενώσεις που περιέχουν αλογόνα π.χ. Cl, Br με ξερές χημικές σκόνες, υδρατμό, CO₂, κλπ.).

1.1.5 Μέσα κατάσβεσης

Τα κυριότερα μέσα κατάσβεσης είναι τα ακόλουθα:

- Νερό (H₂O)
- Αφρός
- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- Αλογονομένοι υδρογονάνθρακες (HALON 1301 ή 1211)
- Ξηρά σκόνη
- Άμμος, χώμα, σκεπάσματα, κ.α.

1.1.5.1 Νερό (H₂O)

Είναι το πιο εύχρηστο μέσο κατάσβεσης, γιατί αφαιρεί μεγάλες ποσότητες θερμότητας από το καιόμενο υλικό και επιφέρει κατάσβεση λόγω ψύξης. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αποπνιγμό, είτε υπό μορφή ομίχλης είτε υπό μορφή υδρατμού.

Πρέπει να γίνεται ορθολογική χρήση του, σε συνάρτηση με την διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, την ένταση της πυρκαγιάς, την φύση του καιόμενου υλικού κ.α. Η κατάλληλη χρήση του νερού, επιβάλλεται και για να μην προκαλούνται ζημιές από το πλεόνασμα ή την αλόγιστη χρήση του.

1.1.5.2 Αφρός

Είναι μίγμα νερού, αφρογόνου υλικού και αέρα. Τα συστατικά υλικά αναμειγνύονται κατά την στιγμή της χρήσης, μέσα σε έναν ισχυρό αναδευτήρα. Μοιάζει με παχύρρευστη σαπουνάδα. Ο αφρός ενεργεί με δύο τρόπους:

- Ως απομονωτικό, καλύπτει την καιόμενη επιφάνεια και διακόπτει την επαφή της με το οξυγόνο του αέρα.
- Ως ψυκτικό, διότι αποτελείται κατά 95% (συνηθέστερα) από νερό.

Ο αφρός χρησιμοποιείται συνήθως για την κατάσβεση πυρκαγιών που εκτείνονται σε οριζόντια επιφάνεια και κυρίως για υγρά καύσιμα (βενζίνη, πετρέλαιο, πίσσα, χρώματα, λάδια, κ.α.).

1.1.5.3 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Το CO₂ είναι αέριο, που δεν καίγεται, ούτε συντηρεί την καύση και είναι βαρύτερο από τον αέρα. Δεν είναι δηλητηριώδες, αλλά είναι ασφυκτικό, όταν βρίσκεται σε μεγάλη αναλογία στον αέρα. Υγροποιείται εύκολα με συμπίεση και στο εμπόριο φέρεται σε χαλύβδινες φιάλες με πίεση 150 - 200 atm.

Όταν ανοιχθεί η στρόφιγγα της φιάλης του CO₂ περνά κατευθείαν από την υγρή κατάσταση στην στερεά (μετατρέπεται σε χιόνι) και λέγεται «ξηρός πάγος» (με θερμοκρασία -78°C).

Το CO₂ δρα κατασβεστικά με τρεις τρόπους:

- Κάνει αποκοπή της φλόγας λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία εξέρχεται από την φιάλη.
- Ψύχει την καιόμενη επιφάνεια λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας του.
- Απομονώνει την καιόμενη επιφάνεια επειδή ως βαρύτερο του αέρα κατακάθεται και διώχνει τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Επειδή το CO₂ μετατρέπεται κατευθείαν από «ξηρό πάγο» σε αέρια μορφή, χωρίς να περάσει από την υγρή φάση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πυρκαγιές έργων τέχνης, καλλιτεχνικών θησαυρών και άλλων ευαίσθητων αντικειμένων, διότι δεν προκαλεί φθορές. Ακόμα επειδή το CO₂ είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ηλεκτρονικούς υπολογιστές κ.α. Για να προσεγγισθούν οι χώροι όπου έχει γίνει προηγουμένως χρήση CO₂, πρέπει ή να ανοιχτούν ή να γίνει προηγουμένως καλός αερισμός.

1.1.5.4 Αλογονομένοι υδρογονάνθρακες (HALON 1301 ή 1211)

Είναι αέρια, άχρωμα και άοσμα. Κατασβένουν όλων των ειδών τις πυρκαγιές. Λειτουργούν κατασβεστικά είτε με διακοπή της χημικής αντίδρασης της καύσης και δέσμευση των «ελευθέρων ριζών», είτε με απομόνωση λόγω εκδίωξης του αέρα. Επειδή όμως περιέχουν αλογόνα – φθόριο (F), χλώριο (Cl), βρώμιο (Br) – δημιουργούνται κατά την χρήση τους ενώσεις οι οποίες καταστρέφουν το όζον (O₃) της ατμόσφαιρας. Έτσι έχει αποφασισθεί να σταματήσει η παραγωγή και η διακίνηση πυροσβεστήρων HALON και, παρόλο που θεωρείται από τα καλύτερα κατασβεστικά υλικά, τείνει να καταργηθεί και να αντικατασταθεί.

1.1.5.5 Νέα κατασβεστικά υλικά – Υποκατάστατα Halon

Χρησιμοποιούνται και διάφορα άλλα υλικά, π.χ. INERGEN, που είναι μίγμα αδρανών αερίων: Αζώτου (N), Αργού (Ar), Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) ή Αργόν

(Ar), CEA 410 (περφθοροβουτάνιο), COLD FIRE 302 (υγρό), FM 200 (επταφθοροπροπάνιο), ARGONITE (50% άζωτο – 50% αργό), ANSULEX (υγρό) και άλλα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποδεκτά κατασβεστικά με την εμπορική ονομασία τους, τη χημική σύστασή τους, καθώς και το είδος χρήσης τους:

α/α	Εμπορική Ονομασία	Χημική Σύσταση	Χρήση
1	CEA – 410	C4F10 (περφθοροβουτάνιο)	σε μόνιμα συστήματα ολικής κατάκλισης
2	CEA – 614	C6H14	σε φορητούς πυροσβεστήρες
3	FM – 200	C3HF7 1,1,1,2,3,3,3 (επταφθοροπροπάνιο)	σε μόνιμα συστήματα ολικής κατάκλισης
4	ARGONITE	*N ₂ (άζωτο) 50% *Ar (αργό) 50%	σε μόνιμα συστήματα ολικής κατάκλισης
5	POLYFOAM	Βασίζεται σε AFFF που παράγεται από την συνένωση υγρών, αφρού και αδρανών αερίων που αναμιγνύονται με το νερό και τα οποία έχουν διαφορετικό σημείο βρασμού.	σε φορητούς πυροσβεστήρες
6	FUEL BUSTER	*Το μετανατρίου άλας ανωτέρων οξέων - αλκοολών. *Ανυδρες ανόργανες ύλες (πυριτικά) ειδικώς επεξεργασθείσες. * Καρβοξυμέθυλο - CELLOSE (CMC) εστεροποιημένο. * Γαλακτοματοποιητές με φωσφορική βάση.	σε φορητούς πυροσβεστήρες
7	INERGEN – 541	* N ₂ (άζωτο) 52% * Ar (αργό) 40% * CO ₂ 8%	σε μόνιμα συστήματα ολικής κατάκλισης
8	COLD FIRE – 302	Μίγμα από ιονικές και μη ιονικές επιφανειακά ενεργές ουσίες ως αφροποιητικά μέσα. Παράγωγα κυτταρίνης ως κατασταλτικά του πυρός. Εκχυλίσματα φυτών.	σε φορητούς πυροσβεστήρες
9	PETROTECH	Μίγμα διαφόρων επιφανειακών ενεργών μέσων με βάση το νερό, όπου δεν υπάρχουν βαρέα μέταλλα, αλογονομένοι υδρ/κες και οργανικοί διαλύτες.	σε φορητούς πυροσβεστήρες
10	AEROSOL GENERATOR	Μίγμα με βάση το ανθρακικό κάλιο	σε μόνιμα συστήματα και φορητούς πυρ/ρες

Πίνακας 1.1.5.5-1: Εμπορική ονομασία, χημική σύσταση και χρήση κατασβεστικών υλικών

1.1.5.6 Ξηρά σκόνη

Είναι το πιο διαδεδομένο υλικό για πυροσβεστήρες. Αποτελείται από διττανθρακικό νάτριο ή κάλιο με προσμίξεις από διάφορα αδρανή υλικά. Εκτοξεύεται από πυροσβεστήρες (φορητούς ή τροχήλατους) και από ειδικά οχήματα αεροδρομίων με την βοήθεια προωθητικών αδρανών αερίων (π.χ. άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα). Είναι κατάλληλη για όλες τις κατηγορίες πυρκαγιών ακόμα και με την παρουσία ρεύματος αρκετών δεκάδων χιλιάδων Volts.

Κατασβεστικά δρα:

- Με αποκοπή της φλόγας λόγω της ορμής με την οποία εκτοξεύεται.
- Με αποπνιγμό αφενός επειδή διώχνει τον αέρα, αφετέρου γιατί ως βαρύτερη επικάθεται στις καιόμενες επιφάνειες και τις απομονώνει από την επαφή με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, ακόμα δε, εμποδίζει και την παραγωγή ατμών.

1.1.5.7 Άμμος, χώμα, σκεπάσματα, κ.α.

Η αποστέρωση του οξυγόνου από μία καιόμενη επιφάνεια μπορεί να επιτευχθεί και με πρόχειρα μέσα, όπως: χώμα, άμμος, γύψος, τσιμέντο, ασβέστης σε σκόνη, μαρμαρόσκονη, διάφορα υφάσματα και σκεπάσματα ιδιαίτερα αν είναι βρεγμένα. Έτσι μπορούν να σβηστούν αποτελεσματικά μικρές πυρκαγιές όπως: πυρκαγιές σε χυμένα στο έδαφος παχύρρευστα υγρά καύσιμα (πίσσα, ασφαλτος), σε ξερά χόρτα, σε καλώδια στην επιφάνεια του δαπέδου κ.α.

1.1.6 Κατηγορίες πυρκαγιών

Οι πυρκαγιές, ανάλογα με το υλικό που καίγεται, χωρίζονται κυρίως σε τέσσερις κατηγορίες:

A: Στερεών καυσίμων υλικών. Συνήθως οργανικής σύνθεσης (ξύλα, χαρτιά, άχυρα, ελαστικά, μερικά πλαστικά, κ.α.).

B: Υγρών καυσίμων υλικών ή στερεών που υγροποιούνται κατά την καύση τους (αιθέρας, οινόπνευμα, βενζίνη, λάδια, λίπη, κερί, κ.α.).

C: Αερίων καυσίμων υλικών (π.χ. μεθάνιο, προπάνιο, υδρογόνο, ασετιλίνη, κ.α.).

D: Μετάλλων (π.χ. νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο, τιτάνιο, κ.α.).

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται και μια πέμπτη κατηγορία η E, που είναι ουσιαστικά μία από τις παραπάνω περιπτώσεις αλλά με την σημαντική παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες ονομάζονται ηλεκτρικές πυρκαγιές.

1.1.7 Κατηγορίες Πυροπροστασίας

Η πυροπροστασία διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: την ενεργητική και την παθητική.

1.1.7.1 Παθητική Πυροπροστασία

Οι απαιτήσεις της παθητικής πυροπροστασίας αναφέρονται ακολούθως:

- Οδεύσεις διαφυγής (τρόποι και μέσα διαφυγής από το κτίριο προς ασφαλή χώρο εκτός του κτιρίου).
- Δείκτης πυραντίστασης (ικανοποιητική αντίσταση στη διάδοση των φλογών των υλικών που χρησιμοποιούνται σε τοίχους και οροφές, ώστε όταν καίγονται να εμφανίζουν περιορισμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας).
- Πυροδιαμερίσματα (διαμερισματοποίηση του κτιρίου ώστε να αποτρέπεται η εσωτερική διάδοση της πυρκαγιάς).

1.1.7.2 Ενεργητική Πυροπροστασία

Ως μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας ορίζεται το σύνολο των μέτρων με τα οποία εξασφαλίζεται η έγκαιρη αυτόματη ανίχνευση και ο εντοπισμός των σημείων όπου εκδηλώθηκε πυρκαγιά, η σήμανση συναγερμού καθώς και η αυτόματη ή χειροκίνητη κατάσβεση. Συνοπτικά τα μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας μπορεί να είναι μερικά ή όλα τα παρακάτω:

α. Σύστημα ανίχνευσης και έγκαιρης ειδοποίησης. Περιλαμβάνει:

- Αυτόματη πυρανίχνευση (ανιχνευτές, πίνακα πυρανίχνευσης, καλωδιώσεις)
- Σήμανση συναγερμού
- Σειρήνες για ηχητική ειδοποίηση
- Φλας για οπτική ειδοποίηση
- Μέσα ενεργοποίησης του συστήματος όπως κομβία χειροκίνητης αναγγελίας πυρκαγιάς
- Όργανα διαπιστώσεως λειτουργίας αυτόματων συστημάτων πυρόσβεσης
- Διακόπτη ροής νερού σε υδροδοτικό δίκτυο με πυροσβεστικές φωλιές ή σε δίκτυο sprinkler
- Όργανα ενδείξεως αντλιών πυρόσβεσης
- Όργανα ενδείξεως λειτουργίας συστημάτων (CO₂, Inergen κλπ)
- Αυτόματη ειδοποίηση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας

β. Συστήματα πυρόσβεσης / κατάσβεσης. Τέτοια συστήματα είναι:

- Αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος (Sprinkler) το οποίο διακρίνεται σε: υγρού τύπου (wet), ξηρού τύπου (dry), προενέργειας (preaction), ολικής κατάκλισης (deluge) και μικτό.
- Αυτόματο σύστημα ψεκασμού σταγονιδίων (water spray) ή ομίχλης (fog).
- Αυτόματο σύστημα κατάκλισης με αφρό (foam).

- Αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με αέρια (CO₂, αλογονομένους υδρογονάνθρακες / HALON, αδρανή αέρια / Inergen, Argonite κλπ).
- Αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με ξηρές σκόνες.
- Υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (πυροσβεστικές φωλιές) – χειροκίνητο.
- Φορητοί πυροσβεστήρες και άλλα μέσα (αντιπυρικές κουβέρτες, άμμος, κλπ).

γ. Συστήματα εξαερισμού καπνού από πυρκαγιά. Ενεργοποιούνται αυτόματα με την πρώτη εμφάνιση της πυρκαγιάς.

δ. Σήμανση οδεύσεων διαφυγής – Φωτισμός ασφάλειας (αν και δεν αποτελεί αντικείμενο της ενεργητικής πυροπροστασίας, εντάσσεται στα σχέδια που κατατίθενται στη πυροσβεστική για την αντίστοιχη άδεια).

1.2 Βασικές Έννοιες

Θεωρείται χρήσιμο να παρουσιαστούν επιγραμματικά οι βασικές έννοιες και ορισμοί που χρησιμοποιούνται για την πυροπροστασία κτιρίων και μετασχηματιστών.

Αδιέξοδο χαρακτηρίζεται μία κοινόχρηστη περιοχή του ορόφου από κάθε σημείο της οποίας η διαφυγή μπορεί να γίνει μόνο προς μία κατεύθυνση.

Άκαυστο δομικό υλικό χαρακτηρίζεται εκείνο που πληροί τα κριτήρια της δοκιμασίας ακαυστότητας.

Ακεραιότητα απέναντι στην φωτιά ενός δομικού στοιχείου είναι η ικανότητά του να εμποδίζει το πέρασμα των φλογών και των θερμών καυσαερίων στη μη εκτεθειμένη πλευρά του, στην περίπτωση προσβολής φωτιάς από την μία πλευρά.

Άμεση απόσταση διαφυγής λέγεται το μήκος της ευθείας γραμμής από τυχόν σημείο ενός ορόφου, μετρούμενη μέσα στο περίγραμμα του κτιρίου, προς την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου, αγνοώντας τα ενδιάμεσα χωρίσματα και τους τοίχους, εκτός από αυτούς του πυροπροστατευμένου κλιμακοστασίου.

Ανιχνευτές πυρκαγιάς λέγονται τα όργανα ενός συστήματος αυτόματης ανίχνευσης πυρκαγιάς, τα οποία συνεχώς ή σε τακτά χρονικά διαστήματα παρακολουθούν την τυχούσα εμφάνιση φυσικών ή και χημικών φαινομένων, επακόλουθων της φωτιάς, σε μια ορισμένη περιοχή του κτιρίου και μεταδίδουν τα αντίστοιχα σήματα συναγερμού ή ελέγχου.

Αντίσταση στην δίοδο της θερμότητας ενός δομικού στοιχείου είναι η ικανότητά του να εμποδίζει τη μετάδοση δια μέσου της μάζας του ενός προκαθορισμένου ποσού θερμότητας.

Απροστάτευτη όδευση διαφυγής λέγεται το πρώτο τμήμα μιας όδευσης διαφυγής, που περιβάλλεται από δομικά στοιχεία χωρίς ειδικές απαιτήσεις πυραντίστασης και καταλήγει σ' ένα χώρο σχετικά ή απόλυτα ασφαλή.

Αυτοκλειόμενο κούφωμα λέγεται εκείνο που είναι εξοπλισμένο με κατάλληλο μηχανισμό επαναφοράς του στην κλειστή θέση.

Αυτόματος καταιονητήρας (sprinkler) λέγεται συσκευή συνδεδεμένη με το δίκτυο παροχής νερού, η οποία ενεργοποιείται αυτόματα σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία και εκτοξεύει νερό ή/και άλλα υλικά.

Έξοδος κινδύνου είναι το άνοιγμα εισόδου σε πυροπροστατευμένη όδευση διαφυγής, ή κατευθείαν σε ασφαλή υπαίθριο χώρο.

Εξωτερικό κλιμακοστάσιο λέγεται εκείνο που κατασκευάζεται έξω από το περίγραμμα του κτιρίου.

Επικίνδυνος χώρος λέγεται κάθε χώρος ενός κτιρίου όπου παράγονται ή/και χρησιμοποιούνται ή/και αποθηκεύονται ιδιαίτερα εύφλεκτα και εκρηκτικά υλικά, υγρά, εμπορεύματα κ.λπ.

Επιφανειακή εξάπλωση φλόγας είναι εκείνη που γίνεται με ορισμένη ταχύτητα πάνω στην επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου ή υλικού, αφού αυτό αναφλεγεί.

Εσωτερικά τελειώματα λέγονται τα κατασκευαστικά στοιχεία με τα οποία γίνεται η τελική διαμόρφωση των εσωτερικών επιφανειών των κτιρίων, όπως επιχρίσματα, επενδύσεις, επιστρώσεις, χρωματισμοί, αρμολογήματα, μονώσεις κ.λπ.

Ευστάθεια σε φωτιά ενός δομικού στοιχείου είναι η ικανότητά του να μην καταρρέει ή να μην ξεπερνά όρια παραμόρφωσης, όταν φορτισμένο με προκαθορισμένο φορτίο, εκτίθεται στην επίδραση της φωτιάς.

Καυστό δομικό υλικό λέγεται οποιοδήποτε υλικό δεν πληροί τα κριτήρια της δοκιμασίας ακαυστότητας.

Όδευση διαφυγής λέγεται μία συνεχής και χωρίς εμπόδια πορεία για τη διαφυγή από οποιοδήποτε σημείο ενός κτιρίου προς ένα ασφαλή, υπαίθριο συνήθως χώρο, σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Οικοδομικό διάκενο λέγεται το κενό που περικλείεται από δομικά στοιχεία (συμπεριλαμβανομένης και της ψευδοροφής) ή περιέχεται μέσα σε ένα δομικό στοιχείο. Στα διάκενα δεν συμπεριλαμβάνονται οι αίθουσες, τα ντουλάπια, τα προστατευμένα φρεάτια, οι καπνοδόχοι και οι διάφοροι αγωγοί.

Οριζόντια έξοδος λέγεται μία έξοδος δια της οποίας παρέχεται δυνατότητα διαφυγής από ένα πυροδιαμέρισμα προς άλλο πυροδιαμέρισμα που βρίσκεται στον ίδιο όροφο ή από έναν όροφο κτιρίου προς όροφο γειτονικού κτιρίου που βρίσκεται στην ίδια περίπου στάθμη. Οριζόντιες εξόδους επιτρέπεται να υποκαθιστούν μέχρι και τις μισές από τις απαιτούμενες εξόδους κινδύνου.

Όροφος εκκένωσης είναι ο όροφος του κτιρίου, από τον οποίο εξέρχονται προς ασφαλή χώρο οι οδεύσεις διαφυγής.

Παροχή όδευσης διαφυγής είναι ο αριθμός των ατόμων που είναι δυνατό να διαφύγει έγκαιρα, σε περίπτωση πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας αυτή την όδευση.

Πραγματική απόσταση απροστάτευτης όδευσης διαφυγής λέγεται το μήκος της πορείας που φυσιολογικά θα διανύσει ένα άτομο για να διαφύγει, σε περίπτωση πυρκαγιάς, από τυχόν σημείο ενός ορόφου μέχρι την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου.

Πυραντίσταση λέγεται η ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου να αντιστέκεται για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, που ονομάζεται **δείκτης πυραντίστασης**, στα θερμικά αποτελέσματα μιας φωτιάς, χωρίς απώλεια της ευστάθειας, της ακεραιότητας και της αντίστασης στη δίοδο της θερμότητας.

Πυράντοχο κούφωμα λέγεται κάθε κούφωμα, που δοκιμαζόμενο μαζί με τις διατάξεις στήριξής του σε δοκιμασία πυραντίστασης, παρουσιάζει ένα καθορισμένο δείκτη πυραντίστασης.

Πυροδιαμέρισμα λέγεται τμήμα κτιρίου ή και ολόκληρο κτίριο που περικλείεται ερμητικά από δομικά στοιχεία με προκαθοριζόμενο, κατά περίπτωση, δείκτη πυραντίστασης.

Πυροθερμικό φορτίο είναι το ποσό της εκλυόμενης θερμότητας από την καύση όλων των υλικών μέσα σε ένα χώρο κτιρίου.

Πυροπροστατευμένη όδευση διαφυγής λέγεται εκείνο το τμήμα της όδευσης (κλιμακοστάσιο, διάδρομος, προθάλαμος κλπ.) που περικλείεται από πυράντοχα δομικά στοιχεία με προκαθορισμένο δείκτη πυραντίστασης.

Πυροφραγμός λέγεται κάθε κατασκευή από άκαυστα ή περιορισμένης καυστότητας υλικά, που διακόπτει οικοδομικό διάκενο ή γεμίζει αρμούς και χάσματα

οικοδομικών στοιχείων, ώστε να εμποδίζεται η διέλευση καπνού και φλογών μέσα από αυτά.

Τελική έξοδος είναι η κατάληξη μιας όδευσης διαφυγής από ένα κτίριο, που οδηγεί σε μια οδό ή σε έναν ανοικτό χώρο ασφαλή από τον κίνδυνο της φωτιάς ή και του καπνού.

1.3 Μονωτικά Υλικά

Στην παράγραφο αυτή, αναλύονται οι θεωρίες σχετικά με τα ηλεκτρομονωτικά υλικά, αέρια, υγρά και στερεά, τα οποία χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές, καθώς και τα φαινόμενα διάσπασης αυτών.

1.3.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών

Στα πλαίσια της ανθρώπινης δραστηριότητας συναντώνται μονωτικά υλικά διαφόρων μορφών και διαφόρων χρήσεων. Το είδος της μόνωσης που προσφέρουν τους προσδίδει και την γενικότερη ονομασία τους, οπότε γίνεται λόγος για θερμομονωτικά, ηχομονωτικά ή ηλεκτρομονωτικά υλικά.

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά αποσκοπούν στην προστασία του ανθρώπου ή άλλων διατάξεων από το ηλεκτρικό ρεύμα. Η θανατηφόρα διέλευση ακόμη και μικρής σχετικά έντασης ηλεκτρικού ρεύματος από το σώμα του ανθρώπου, γνωστή και ως ηλεκτροπληξία, οδήγησε στην χρησιμοποίηση υλικών που έχουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα: να εμποδίζουν τη δημιουργία αγώγιμου δρόμου ανάμεσα σε δύο διαφορετικής φόρτισης σημεία προβάλλοντας μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Ένας ακόμη λόγος είναι η αποφυγή αποτυχίας του συστήματος, που έχει καταστρεπτικές συνέπειες για τον ηλεκτρικό – ηλεκτρονικό εξοπλισμό και συχνά συντελεί σε εκδήλωση πυρκαγιάς, καθώς συνεπάγεται μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος.

1.3.1.1 Αέρια Μονωτικά Υλικά

Ο ατμοσφαιρικός αέρας συνιστά διηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται σε περίσσεια στη φύση και χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό στην πλειονότητα των ηλεκτρολογικών εφαρμογών, όπως παραδείγματος χάριν στο τεράστιο σε μέγεθος δίκτυο των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις περιπτώσεις, όμως, μεταφοράς υπερυψηλής τάσης και εξαιτίας της ιδιαίτερα χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς του, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στη μονάδα, απαιτούνται μεγάλα διάκενα μεταξύ αγωγών. Το παραπάνω αποτελεί μειονέκτημα του αέρα ως μονωτικού έναντι των υπολοίπων. Βέβαια, η επιστημονική έρευνα τα τελευταία χρόνια εστιάζει στην ανάπτυξη αέριων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Από τα ήδη υπάρχοντα μονωτικά αέρια, το εξαφθοριούχο θείο (SF_6) μονοπωλεί το ενδιαφέρον. Πρόκειται για σπουδαίο μονωτικό αέριο, που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης, προκειμένου να μειωθούν οι αποστάσεις μόνωσης. Σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, εμφανίζει τη μισή διηλεκτρική αντοχή, σε σύγκριση με τα μονωτικά έλαια, αλλά σε υψηλότερες πιέσεις υπερέχει.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το εξαφθοριούχο θείο (sulfur hexafluoride) αποτελεί το πλέον γνωστό και συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο μονωτικό υλικό. Η διηλεκτρική του αντοχή σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι δύο φορές καλύτερη από αυτήν του

αέρα, ενώ παράλληλα διαθέτει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπόνησης και δυνατότητα σβέσης του ηλεκτρικού τόξου. Ορισμένες από τις βασικότερες ιδιότητές του αναφέρονται στον πίνακα 1.3.1.1-1 που ακολουθεί:

Μοριακός Τύπος	SF_6
Μοριακό Βάρος	146,06 g/mol
Πυκνότητα	<ul style="list-style-type: none"> • 6,164 g/L, ως αέριο σε 1 ατμόσφαιρα (~5.1 πιο πυκνό από τον αέρα) • 1,329 kg/L, ως υγρό στους 25 °C • 2,510 kg/m³ ή 2,510 kg/L, ως στερεό στους -50.8 °C
Σημείο Ζέσης	-64 °C
Σημείο Τήξης	-50,8 °C

Πίνακας 1.3.1.1-1: Βασικές ιδιότητες εξαφθοριούχου θείου (SF_6)

Το εξαφθοριούχο θείο χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών, χαρακτηριστικότερες από τις οποίες είναι:

- Το 80% της παραγωγής του προορίζεται για μονωτικό αέριο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε διακόπτες, η παρουσία εξαφθοριούχου θείου δίνει τη δυνατότητα μείωσης των αποστάσεων μόνωσης κατά 10 φορές.
- Το 19% της παραγωγής προορίζεται για τη διαδικασία επεξεργασίας με πλάσμα στην κατασκευή ημιαγωγών κατάλληλης μορφολογίας.
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή μετάλλου του μαγνησίου.
- Δρα βοηθητικά στην ανακύκλωση του αλουμινίου, μειώνοντας το πορώδες του μετάλλου.
- Χρησιμοποιείται ακόμη και ως θερμομονωτικό ή ηχομονωτικό στα ελαστικά των αεροπλάνων, σε σόλες σπορ υποδημάτων, σε αεριοθαλάμους δυτών κ.α.
- Σε αρκετές περιπτώσεις δρα επικουρικά στη μέτρηση της στεγανότητας του εδάφους όπως για παράδειγμα στον έλεγχο διαρροής πυρηνικών αποβλήτων.
- Απορροφά τμήμα του υπέρυθρου φάσματος της ακτινοβολίας και για αυτό χρησιμοποιείται στο θόλο αεροσκαφών τύπου AWACS.

Σήμερα πάντως, η επιστημονική έρευνα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στον προσδιορισμό νέων μειγμάτων αερίων, τα οποία θα έχουν συγκρίσιμη τουλάχιστον αντοχή διάσπασης με αυτή του εξαφθοριούχου θείου, ενώ παράλληλα θα προσφέρουν τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Παραδείγματα τέτοιων μειγμάτων είναι συνδυασμός του SF_6 με φθηνά αέρια συστατικά όπως ο αέρας, το άζωτο (N_2), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και άλλα και βρίσκονται συνεχώς υπό πειραματικές δοκιμές προκειμένου να κατανοηθούν καλύτερα οι διαδικασίες που αφορούν στη συμπεριφορά και χρήση των αερίων μονωτικών.

1.3.1.2 Υγρά Μονωτικά Υλικά

Σε αντίθεση με τον αέρα, τα υγρά μονωτικά υλικά εμφανίζουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή σε συνθήκες πίεσης μίας ατμόσφαιρας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ορισμένα από τα έλαια που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές έχουν τρεις έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα. Αυτό αυτόματα συνεπάγεται ότι ανάλογη είναι και η δυνατότητα για ελαχιστοποίηση των διακένων ασφαλείας που απαιτούνται στις ηλεκτρολογικές διατάξεις. Ορισμένες από τις ιδιότητές τους είναι:

- Η χρησιμοποίησή τους αποκλείει την ύπαρξη αέρα κατά το συνδυασμό τους με στερεά μονωτικά και συνεπάγεται τον περιορισμό της φθοράς των επιφανειών των στερεών μονωτικών. Η απομάκρυνση του αέρα γίνεται με τη μετάγγιση στο χώρο της διάταξης υγρού μονωτικού υπό συνθήκες κενού, όπως χαρακτηριστικά γίνεται στην πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών με λάδι.
- Η διηλεκτρική σταθερά των ελαίων είναι σε τιμή παραπλήσια αυτής του απλού χαρτιού με αποτέλεσμα ο συνδυασμός των ανωτέρω να προτιμάται συχνά.

Ευρέως χρησιμοποιούμενα υγρά μονωτικά υλικά είναι διαφόρων ειδών λάδια. Αποτελούν προϊόν της απόσταξης του πετρελαίου, που ανάλογα με την προέλευση και επεξεργασία του καυσίμου διαφοροποιούν και τη χημική τους σύσταση. Τα διακρίνουμε στις εξής κατηγορίες:

- Τα μεθανέλαια: Στα λάδια αυτά κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης. Από τη γεωλογική άποψη είναι τα παλαιότερα λάδια.
- Τα ναφθανέλαια: Κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης.

Ένα στοιχείο που λαμβάνει κανείς υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας μονωτικής διάταξης, είναι και οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την ομαλή λειτουργία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ή κατά την εμφάνιση υπερεντάσεων. Δηλαδή, η θερμοκρασία ανάφλεξης των ελαίων αποτελεί βαρυσήμαντο παράγοντα στη διασφάλιση του επιθυμητού επιπέδου μόνωσης και της απρόσκοπτης λειτουργίας της διάταξης. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης της πλειονότητας των ελαίων κυμαίνεται από 130 °C έως 250 °C. Αυτός είναι και ο λόγος που ως μέγιστη θερμοκρασία ανεκτής καταπόνησής τους έχουν ορισθεί στις προδιαγραφές οι 90 °C.

Ένας ακόμη παράγοντας που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, με βάση το σκεπτικό ότι μεγάλος αριθμός ηλεκτρολογικών διατάξεων και δη μετασχηματιστών βρίσκονται σε μικρή απόσταση από ανθρώπινη δραστηριότητα, είναι η τοξικότητα των υγρών μονωτικών υλικών. Τα μονωτικά λάδια δεν περιέχουν τοξικές ουσίες και είναι ακίνδυνα για το προσωπικό που εκτελεί εργασίες κατασκευής και συντήρησης και έρχεται σε άμεση επαφή με αυτά.

Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των μονωτικών λαδιών είναι αυτό της οξείδωσης από τον αέρα. Το παραπάνω συνεπάγεται μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους και για αυτό αποκλείεται ο αέρας από τις κατασκευές που χρησιμοποιούν λάδι ως μονωτικό μέσο.

1.3.1.3 Στερεά Μονωτικά Υλικά

Τα στερεά μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές μετάδοσης υψηλής τάσης είναι κατασκευασμένα από γυαλί, πορσελάνη ή σύνθετα πολυμερή.

Οι μονωτήρες πορσελάνης είναι κατασκευασμένοι από άργιλο, χαλαζία, αργιλοξειδίο (alumina) κ.α. Η δυνατότητα που δίνεται με την πορσελάνη, αλλά και γενικότερα τα στερεά υλικά, είναι η διαμόρφωση του σχεδίου τους έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ευνοϊκότερα μήκη κατά τη μόνωση. Γι' αυτό και στη μορφή τους χαρακτηρίζονται από κυρτώσεις, εσοχές, αύλακες. Τέλος, όπου είναι κριτήριο η μεγάλη μηχανική αντοχή χρησιμοποιούνται μονωτήρες πορσελάνης εμπλουτισμένοι με αργιλοξειδίο.

Οι γυάλινοι μονωτήρες παλιότερα (αλλά και μέχρι σήμερα σε αρκετές περιπτώσεις) χρησιμοποιούνταν για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς. Σήμερα, συνηθίζεται η χρήση κεραμικών ή άλλων σύνθετων υλικών.

Πρόσφατα, η ανάγκη ορισμένων ηλεκτρικών εφαρμογών για μόνωσεις με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των μονωτικών. Έτσι, εμφανίστηκαν πολυμερή σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες ενισχυμένου πλαστικού με περίβλημα γομώσεως σιλικόνης ή EPMD (ένωση προπυλενίου-αιθυλενίου). Τα σκευάσματα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο ελαφριά, κοστίζουν λιγότερο και έχουν άριστη συμπεριφορά σε υγρό περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, δεν έχουν καταφέρει να ξεπεράσουν σε αντοχή και διάρκεια ζωής το γυαλί και την πορσελάνη.

Σε μετασχηματιστές, γεννήτριες και ηλεκτρικούς κινητήρες, η μόνωση των τυλιγμάτων χαλκού αποτελείται από ένα έως τέσσερα στρώματα από βερνικωμένα φύλλα μονωτικού υλικού. Τα φύλλα δίνουν τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να επιτύχει το μέγιστο δυνατό αριθμό χάλκινων ελιγμάτων στον περιορισμένο χώρο της μηχανής. Πηνία που αποτελούνται από παχύτερους αγωγούς είναι δυνατό να είναι τυλιγμένα με βοηθητικές μονωτικές ταινίες. Τα βερνίκια ενισχύουν την προστασία του μετασχηματιστή και αποφεύγονται οι ηλεκτρικές καταπονήσεις.

Μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούν ως μόνωση χαρτί, ξύλο και λάδι. Τα παραπάνω υλικά, μαζί με τα βερνίκια, χρησιμοποιούνται για παραπάνω από εκατό χρόνια και προσφέρουν καλό δείκτη απόδοσης-τιμής.

Σε παλιές εφαρμογές μόνωσης μετασχηματιστών, μέχρι τη δεκαετία του '70, υπάρχουν πλάκες από συμπυκνωμένο αμίαντο. Η τεχνική αυτή τείνει να εκλείψει καθώς είναι ακατάλληλη σε χαμηλές συχνότητες ρεύματος και επιβαρύνει το περιβάλλον.

1.3.2 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση στερεών μονωτικών υλικών

Η έρευνα πάνω στο φαινόμενο της αλλαγής της δομής και κατ' επέκταση της συμπεριφοράς των στερεών μονωτικών κατά τη διάσπασή τους, οδήγησε στην αναζήτηση των παραγόντων που την προκαλούν. Τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Οι παρατηρήσεις της αλλοίωσης της μοριακής δομής σε συνδυασμό με μετρήσεις που έγιναν σε μονωτικά υλικά και αφορούν σε μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της επιβαλλόμενης τάσης, συνέτειναν στο ότι οι λόγοι της διάσπασης οφείλονται σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων στους ακόλουθους παράγοντες:

1. Στις απώλειες Joule
2. Στις δυνάμεις Coulomb
3. Στις μερικές εκκενώσεις
4. Στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι αντίστοιχες προς τα παραπάνω μορφές της διάτρησης είναι:

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

1.3.2.1 Η θερμική διάτρηση

Το φαινόμενο της θερμικής διάτρησης εμφανίζεται λόγω της θερμικής καταπόνησης του υλικού σε χαμηλές τιμές τάσης και οφείλεται στις απώλειες Joule. Σαν αποτέλεσμα έχει την τήξη ή/και απανθράκωση του υλικού, ιδιαίτερα σε περιοχές που οι απώλειες Joule είναι αυξημένες. Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποιο σημείο του υλικού αποκτήσει την απαιτούμενη για θερμική διάτρηση οριακή τιμή, η οποία και χαρακτηρίζει το υλικό.

1.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν στο δοκίμιο εφαρμόζεται τάση με ενεργό τιμή αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που δύναται να προκαλέσει θερμική διάτρηση, υπάρχει το ενδεχόμενο να σημειωθεί ηλεκτρική διάτρηση. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη πεδιακή ένταση και συνεπώς στην αυξημένη ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Για το λόγο αυτό, από μια τιμή της τάσης κι έπειτα η διάτρηση του υλικού αποδίδεται στις δυνάμεις Coulomb και όχι στη θερμότητα Joule που αναπτύσσεται.

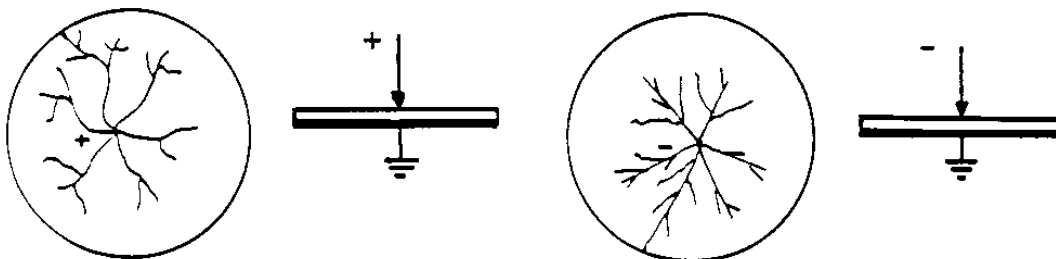
Έτσι, θεωρείται ότι η διάτρηση οφείλεται σε:

1. Αυτοσυντηρούμενο ιονισμό που παραμένει σε περιοχή του υλικού, το καταπονεί και έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη διάτρησή του.
2. Μηχανική τάνυση του υλικού, δηλαδή διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου.
3. Συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων.

Η ηλεκτρική διάτρηση χαρακτηρίζεται ως:

- Δενδροειδής (εμφανίζονται θύσανοι με διεύθυνση κάθετη στο ηλεκτρικό πεδίο)
- Υπό μορφή οχető με διεύθυνση τη διεύθυνση του πεδίου

Η δενδροειδής διάτρηση δεν αποτελεί παρά θερμικό φαινόμενο μικρότερης όμως χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, διότι λόγω της μεγαλύτερης πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.3.2.2-1 που ακολουθεί δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης.



Σχήμα 1.3.2.2-1: Μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης: αριστερά φαίνεται η περίπτωση της θετικής ακίδας, δεξιά φαίνεται η περίπτωση της αρνητικής ακίδας.

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

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

Όσον αφορά στη διάτρηση υπό μορφή οχető και σε αντιδιαστολή με την δενδροειδή, σημειώνεται ότι αυτή εμφανίζεται ως επί το πλείστον σε περιπτώσεις εφαρμογής τάσης μεγαλύτερης ενεργού τιμής. Η διάτρηση συμβαίνει εξαιτίας των δυνάμεων Coulomb που αναπτύσσονται μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και των ηλεκτροδίων της πειραματικής διάταξης.

Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι της τάξης των μs και η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό ύστερα από την καταπόνηση, είναι ενδεικτική μιας ακαριαίας άσκησης δυνάμεων στην περιοχή, όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάτρησης υπό μορφή οχető οφείλεται στη μηχανική καταπόνηση της μοριακής δομής του υλικού.

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

1.3.2.3 Τεχνητή Γήρανση

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης, εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχής, διαπιστώνει κανείς ότι, μετά από κάποια τιμές της τάσης, εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου, όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο.

Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής έχει ορισθεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων, προς την τάση της διηλεκτρικής δοκιμής που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

1.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση

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

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή, αποτελεί το κριτήριο για το τεchnοοικονομικό πάχος στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κτλ.). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz, της τάξης του 1MV. Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης από ότι σε κανονική θερμοκρασία 20 °C, με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός με κρούσεις σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

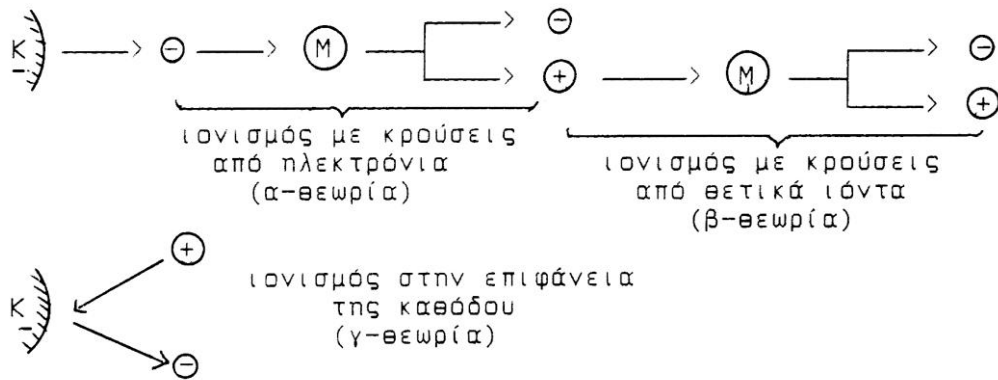
1.3.2.5 Μηχανική Αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν (εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ.: τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, κλπ.). Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών.

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ.: πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κλπ.). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση, π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης, δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, αλλά και με το συνδυασμό της απαιτούμενης μηχανικής αντοχής, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

1.3.3 Διάσπαση των αέριων μονωτικών

Η διάσπαση των αέριων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thowsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend δίνεται στο παρακάτω σχήμα:

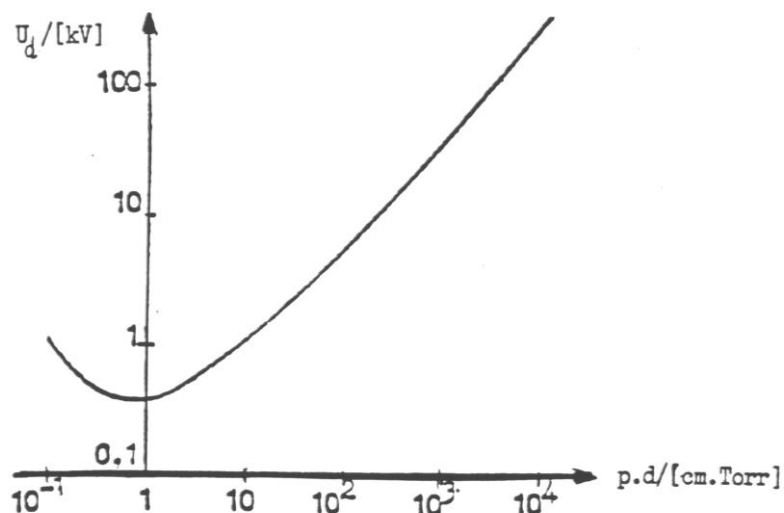


Σχήμα 1.3.3-1: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Townsend. (K : κάθοδος, - : ηλεκτρόνιο, + : θετικό ιόν, M : Μόριο)

Σύμφωνα με το σχήμα 1.3.3-1 η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού με κρούσεις:

- Με κρούσεις από ηλεκτρόνια επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- Με κρούσεις από θετικά ιόντα επί ατόμων ή μορίων του αερίου
- Με κρούσεις θετικών ιόντων στην επιφάνεια της καθόδου (επιφανειακός ιονισμός)

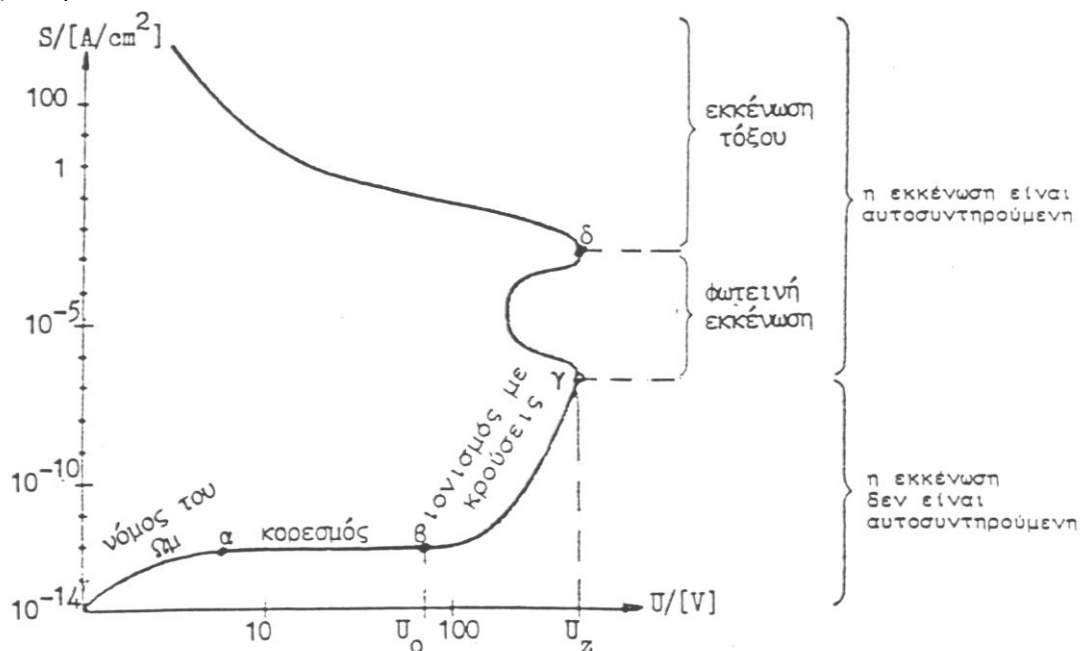
Κατά το νόμο του Paschen, η τάση έναυσης (U_z : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από τη σχέση $U_z = f(p \cdot d)$, όπου p η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.3.3-2:



Σχήμα 1.3.3-2: Χαρακτηριστική $U_z = f(p \cdot d)$ για τον αέρα σε κανονική θερμοκρασία

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης κατά τη καταπόνηση με εναλλασσόμενες τάσεις υπό κανονικές συνθήκες (200 °C, 760 Torr). Η χαρακτηριστική δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 1.3.3-3 για πυκνότητα ροής (S) ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στη περιοχή της ανόδου, με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διακένου και να διευκολύνεται εκδήλωση διαδοχικών οχετών, ανάλογα με την μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.3.3-3: Χαρακτηριστική "τάσης –πυκνότητας ροής" των αερίων, υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdorffer (U_0 : αρχική τάση, U_z : τάση έναυσης, S: πυκνότητα ροής)

1.3.4 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθίσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και υγρά μονωτικά όταν εγκλωβίζονται σε αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών).

Ως παράδειγμα αναφέρεται ο συνδυασμός χαρτί – μονωτικό λάδι, ο οποίος έχει δείξει στην πράξη ότι είναι μια πολύ καλή μόνωση, γιατί εκτός του ότι τα παραπάνω υλικά έχουν την ίδια περίπου διηλεκτρική σταθερά, το λάδι εμποτίζει το χαρτί και δεν επιτρέπει έτσι την ύπαρξη αέρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα υγρά και τα στερεά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών υψηλής τάσης με μονωτικό λάδι, όταν αυτό δεν πραγματοποιείται υπό συνθήκες κενού.

1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Ακολούθως, παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεώρηση, η οποία λαμβάνει υπόψη τις θεωρητικές μορφές διάτρησης, καθώς και τη κβαντομηχανική θεώρηση για τη γήρανση και τη διάσπαση των μονωτικών.

1.4.1 Μακροσκοπική Θεώρηση

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους, που οδηγούν στις αντίστοιχες θεωρητικές μορφές διάτρησης:

- Οι απώλειες Joule που οδηγούν σε θερμική διάτρηση.
- Οι δυνάμεις Coulomb που οδηγούν σε ηλεκτρική διάτρηση.
- Οι μερικές εκκενώσεις που οδηγούν στην ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση).
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που οδηγεί σε θερμοχημική διάτρηση.

1.4.1.1 Θερμική Διάτρηση και Μετασχηματιστής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μορφή της θερμικής διάτρησης συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνον από τις απώλειες Joule. Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule.

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίδεται από τη σχέση: $\sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta}$.

Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε: $\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta}$.

Επομένως η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας και η αύξηση των απωλειών Joule του μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης, θα πρέπει να παρασταθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή με μια μεταβλητή αγωγιμότητα G , παράλληλα με τη χωρητικότητα C_0 του ιδανικού μονωτή (βλ. σχήμα 1.4.1.4-1).

Η διάτρηση στην τιμή U_0 της τάσης συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 σε σ_1), μια οριακή τιμή G_{max} .

1.4.1.2 Ηλεκτρική Διάτρηση και Μετασηματιστής

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο μονωτικό, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

Από μια τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πόλωσης του μονωτικού.

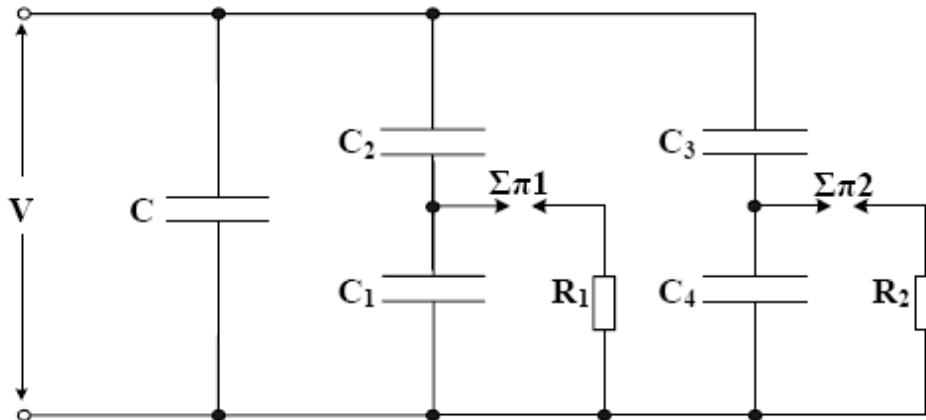
Η πόλωση του μονωτικού έχει αποδοθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.4-1 με την παράλληλη διάταξη κλάδων που περιλαμβάνουν τις αντιστάσεις R_{ai} και τις χωρητικότητες C_{ai} .

Προκειμένου να συμπεριληφθεί η ηλεκτρική (ηλεκτρομηχανική) διάτρηση στο ισοδύναμο κύκλωμα, παρεμβάλλεται ο σπινθηριστής Σ_{π} στην παράλληλη διάταξη των κλάδων πόλωσης. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή Σ_{π} , την αντίσταση του τόξου R_{π} (υποτίθεται ότι ο Σ_{π} διασπάται ταυτόχρονα με κάποιον ή κάποιους πυκνωτές C_{ai}) και την αντίσταση ή τις αντιστάσεις R_{ai} .

1.4.1.3 Διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων. Ηλεκτροχημική διάτρηση ή γήρανση της μόνωσης και Μετασηματιστής

Οι θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού είναι σημεία εμφάνισης των μερικών εκκενώσεων, οι οποίες οδηγούν στη διάσπαση του μονωτικού. Οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του μονωτικού, εντονότερη στις πλέον αγώγιμες θέσεις ανομοιογένειας. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο το οποίο προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής και σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού. Για το λόγο αυτό η ηλεκτροχημική διάτρηση ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού.

Η ηλεκτροχημική διάτρηση αποδίδεται με το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, συμπληρωμένο ώστε να αποδίδει τόσο τις εσωτερικές μερικές εκκενώσεις σε μια ανομοιογένεια (π.χ. φυσαλίδα αερίου), όσο και τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο φαίνεται παρακάτω τόσο στο σχήμα 1.4.1.3-1, όσο και στο σχήμα 1.4.1.4-1.



Σχήμα 1.4.1.3-1: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

V : επιβαλλόμενη τάση στο μονωτικό

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας

C_4 : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C_3 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R_1 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_1$

R_2 : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma\pi_2$

1.4.1.4 Θερμοχημική Διάτρηση και Μετασηματιστής

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική διάτρηση. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού είναι δεδομένη, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη.

Έτσι:

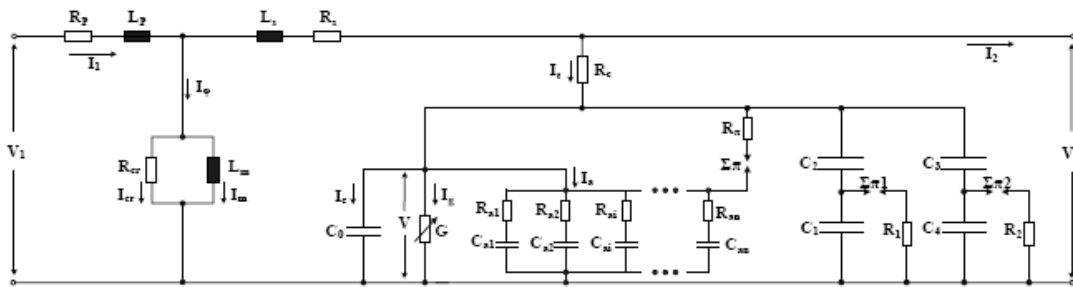
- Αυξάνεται η ειδική αγωγιμότητα.
- Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου.

Σημειώνεται δηλαδή μια συνέργεια μεταξύ των διαφόρων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού και της θερμότητας του περιβάλλοντος αυτό μέσου.

Έτσι αυξάνει διαχρονικά ο συντελεστής απωλειών ($\text{tg}\delta$) και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού.

Επομένως για να εκφραστεί η καταπόνησή του υλικού από τη θερμότητα περιβάλλοντος, όπως και προηγουμένως στις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυση τους από τις μερικές εκκενώσεις), θα πρέπει να θεωρηθεί η παράλληλη αγωγιμότητα G , ως μεταβλητή (βλέπετε σχήμα 1.4.1.4-1).

Μετά τα παραπάνω, το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή διαμορφώνεται όπως δείχνεται στο σχήμα 1.4.1.4-1. Εννοείται ότι για ένα τριφασικό μετασχηματιστή ισχύει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα για κάθε φάση του.



Σχήμα 1.4.1.4-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή στο οποίο έχουν ληφθεί υπόψη τα φαινόμενα αγωγιμότητας και πόλωσης του μονωτικού συστήματός του, καθώς επίσης η ηλεκτρική και η ηλεκτροχημική διάτρηση αυτού.

R_p : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος - L_p : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος - R_s : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος - L_s : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος

V : Τάση επί του μονωτικού

I_t : Συνολικό ρεύμα μέσω του σώματος της μόνωσης

I_c : Ρεύμα φορτίσεως της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0

I_g : Ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας

I_a : Ρεύμα απορροφήσεως

R_c : Αντίσταση συνδέσεων και επαφών

C_0 : Γεωμετρική χωρητικότητα του μετασχηματιστή

G : Αγωγιμότητα της μόνωσης

R_{ai} : Ωμική αντίσταση της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

C_{ai} : Χωρητικότητα της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

R_{π} : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_{π}

C_1 : Χωρητικότητα της φυσαλίδας - C_4 : Χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής - C_2 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού - C_3 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$

1.4.2 Κβαντομηχανική Θεώρηση

Η κβαντομηχανική θεωρία αναλαμβάνει να ερμηνεύσει φαινόμενα που δεν μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, τα οποία όμως θεωρείται ότι εκδηλώνονται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση των μονώσεων. Πρόκειται κυρίως για:

- τον ιονισμό με κρούσεις, και
- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στη κβαντομηχανική θεώρηση, το ενδιαφέρον κυρίως εστιάζεται στην ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) και εξ αυτής (της ενέργειας) στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών είναι:

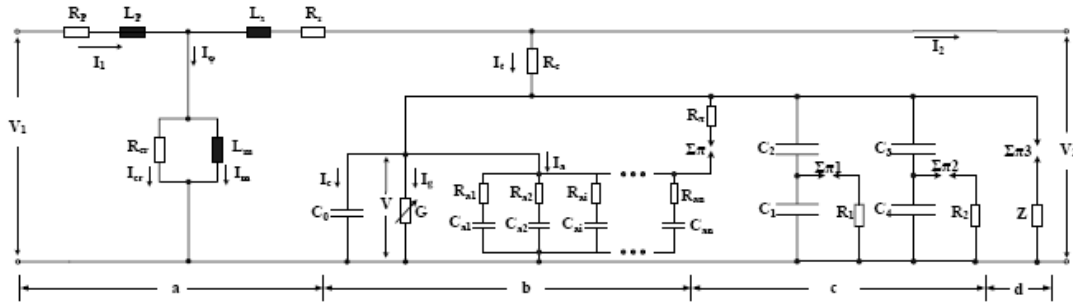
- Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό.
- Υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου $0,2\text{MV/cm}$.
- Για τιμές πεδίου μέχρι περίπου $0,5\text{MV/cm}$ αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση: $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$
- Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου δεν ισχύει η παραπάνω σχέση. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι για την ερμηνεία των φαινομένων χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες (μακροσκοπική και κβαντομηχανική), ώστε να συμπεριληφθούν και τα συμβαίνοντα όταν η πεδιακή ένταση E είναι πολύ μεγαλύτερη της πεδιακής έντασης E_0 ($\sim 0,2\text{ MV/cm}$), στην οποία μόλις συμβαίνει έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει η σχέση $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$, αλλά έχουμε μεγάλη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από ιονισμό με κρούσεις και εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό.

Μετά τα παραπάνω, το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή διαμορφώνεται όπως στο σχήμα 1.4.2-1.

Σύμφωνα με αυτό, στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.1.4-1, έχει προστεθεί ένας παράλληλος κλάδος ο οποίος περιλαμβάνει την εν σειρά σύνδεση της αρνητικής διαφορικής αντίστασης Z και του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 3}$ για την εκδήλωση της Z .



Σχήμα 1.4.2-1: Ένα ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή για την ερμηνεία των φαινομένων με συνδυασμό της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας.

R_p : Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος - L_p : Επαγωγή σκεδάσεως πρωτεύοντος - R_s : Ωμική αντίσταση δευτερεύοντος - L_s : Επαγωγή σκεδάσεως δευτερεύοντος

V : Τάση επί του μονωτικού

I_t : Συνολικό ρεύμα μέσω του σώματος της μόνωσης

I_c : Ρεύμα φορτίσεως της γεωμετρικής χωρητικότητας C_0

I_g : Ρεύμα διαρροής ή αγωγιμότητας

I_a : Ρεύμα απορροφήσεως

R_c : Αντίσταση συνδέσεων και επαφών

C_0 : Γεωμετρική χωρητικότητα του μετασχηματιστή

G : Αγωγιμότητα της μόνωσης

R_{ai} : Ωμική αντίσταση της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

C_{ai} : Χωρητικότητα της i ομάδας διπόλων της μόνωσης

R_π : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σ_π

C_1 : Χωρητικότητα της φυσαλίδας - C_4 : Χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής - C_2 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού - C_3 : Χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R_1 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 1}$

R_2 : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή $\Sigma_{\pi 2}$

$\Sigma_{\pi 3}$: Σπινθηριστής για την εκδήλωση της αρνητικής διαφορικής αντίστασης Z

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή, όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 1.4.2-1, διακρίνονται τα παρακάτω τμήματα, στα οποία μπορούμε να μελετηθούν τα αντίστοιχα φαινόμενα:

Τμήμα α: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματισμού τάσεων και εντάσεων.

Τμήμα β: Εδώ μπορούν να μελετηθούν τα φαινόμενα πόλωσης του μονωτικού. Επίσης τα φαινόμενα θερμικής διάτρησης που παρατηρούνται σε χαμηλές πεδιακές εντάσεις, λόγω αύξησης της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κυρίως εξαιτίας των απωλειών Joule, αλλά και εξαιτίας αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (θερμοχημική διάτρηση).

Τμήμα γ: Στο τμήμα γ μπορεί να μελετηθεί η ηλεκτρική διάτρηση του μονωτικού, σε υψηλότερες από πριν πεδιακές εντάσεις, όπου η διάτρηση αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Επίσης, μπορεί να μελετηθεί η

ηλεκτροχημική διάσπαση του μονωτικού λόγω μερικών εκκενώσεων, σε θέσεις ανομοιογένειας, μέσα στον όγκο ή στην επιφάνεια του μονωτικού.

Τμήμα d: Στο τμήμα d, μπορούν να μελετηθούν, συνδυάζοντας τη μακροσκοπική και την κβαντική θεωρία, τα φαινόμενα για πεδιακές εντάσεις πολύ μεγαλύτερες από 0,5MV/cm.

Εννοείται ότι για ένα τριφασικό μετασχηματιστή (όπως οι μετασχηματιστές του δικτύου διανομής) ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4.2-1 για κάθε φάση του.

1.5 Ψύξη Μετασχηματιστών

Όπως σε όλες τις ηλεκτρομαγνητικές συσκευές, έτσι και στους μετασχηματιστές εμφανίζονται απώλειες υπό μορφή θερμότητας οι οποίες θερμαίνουν τόσο τα τυλίγματα όσο και τον σιδηρό πυρήνα. Αυτές συνίστανται σε απώλειες θερμότητας στο αγώγιμο υλικό και απώλειες θερμότητας από υστέρηση και δινορρεύματα στον σιδηρό πυρήνα, και πρέπει με οποιονδήποτε τρόπο να απαχθούν εκτός του μετασχηματιστή, στον περιβάλλοντα χώρο από αέρα.

Ως μέσα ψύξεως χρησιμοποιούνται συνήθως ο αέρας και το λάδι. Για αυτό, από απόψεως ψύξεως οι μετασχηματιστές διακρίνονται αντιστοίχως σε ξηρούς μετασχηματιστές και σε μετασχηματιστές λαδιού. Οι ξηροί μετασχηματιστές ψύχονται ή με ακτινοβολία και φυσική έλξη (αυτόψυξη) ή με τη βοήθεια ανεμιστήρα (εξωτερικός αερισμός).

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζει το λάδι ως μέσο ψύξεως έναντι του αέρα είναι τα εξής:

- Το μεγαλύτερο ειδικό βάρος, η μεγαλύτερη ειδική θερμότητα και η μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα του λαδιού έχουν ως αποτέλεσμα αφενός μεν την καλή απαγωγή της θερμότητας των απωλειών σιδήρου και χαλκού (τυλίγματος), αφετέρου δε τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας θερμότητας πράγμα το οποίο ισχύει για προσωρινές υπερφορτίσεις.
- Το λάδι αντέχει σε υψηλότερες τάσεις σε σχέση με τον αέρα, επειδή η αντοχή διασπάσεως του λαδιού μετασχηματιστών είναι περίπου εξαπλάσια του αέρα.

Το λάδι εν τούτοις του μετασχηματιστή πρέπει να προστατευθεί από την υγρασία και τον αέρα. Έτσι οι ίνες που περιλαμβάνονται στο λάδι απορροφούν νερό το οποίο υποβιβάζει την αντοχή διασπάσεως του λαδιού. Εξάλλου, το θερμό λάδι σε επαφή με τον αέρα αποσυντίθεται με πρόσληψη οξυγόνου.

Η προστασία του λαδιού έναντι της υγρασίας και του αέρα γίνεται συνήθως μέσω του δοχείου διαστολής λαδιού. Ο μετασχηματιστής συνδέεται με σωλήνα με το δοχείο διαστολής σε τρόπο ώστε ο σωλήνας αυτός εξέχει λίγο μέσα στον πυθμένα του δοχείου. Στην ψυχρή κατάσταση, το λάδι πρέπει να καταλαμβάνει μέρος του δοχείου διαστολής με τρόπο τέτοιο, ώστε το κιβώτιο λαδιού του μετασχηματιστή να είναι πλήρες με βεβαιότητα. Το λάδι στο δοχείο διαστολής καθίσταται ψυχρότερο από το λάδι στο κιβώτιο του μετασχηματιστή, με τρόπο τέτοιο, ώστε με την επαφή της σχετικά μικρής επιφάνειας του λαδιού αυτού με τον αέρα να μην λαμβάνει χώρα οξείδωση. Νερό από συμπύκνωση δεν μπορεί να συγκεντρωθεί στο εσωτερικό πάνω στο κάλυμμα του κιβωτίου, παρά μόνο στον πυθμένα του δοχείου διαστολής από το οποίο μπορεί τούτο να εξαχθεί μέσω στρόφιγγας επειδή ο σωλήνας συνδέσεως με το κιβώτιο του μετασχηματιστή εξέχει λίγο από τον πυθμένα του δοχείου διαστολής. Για υψηλές τάσεις λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα προστασίας του λαδιού.

Κατά την αυτοψύξη, η θερμότητα που παράγεται στον σιδηρό πυρήνα και τα τυλίγματα, μεταφέρεται διά του λαδιού επί του κιβωτίου λαδιού, το οποίο ψύχεται με ακτινοβολία και φυσική έλξη. Το πρόβλημα της ψύξης καθίσταται πιο έντονο,

καθώς η ικανότητα του μετασχηματιστή αυξάνει. Αυτό δικαιολογείται ως εξής: Εάν όλες οι γραμμικές διαστάσεις ενός μετασχηματιστή αυξηθούν κατά την ίδια σχέση, οι επιφάνειες και διατομές αυξάνονται με το τετράγωνο της σχέσεως, ενώ οι όγκοι αυξάνονται με τον κύβο της σχέσεως. Συνεπώς, ροή και μαγνητεγερτική δύναμη αυξάνονται με το τετράγωνο της σχέσεως, ενώ η ικανότητα σε kVA αυξάνεται με την τέταρτη δύναμη της σχέσεως. Εφόσον οι απώλειες είναι ανάλογες προς τον όγκο, υπό σταθερά ροή και πυκνότητα ρεύματος, αυτές αυξάνονται με τον κύβο της σχέσεως. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η απόδοση του μετασχηματιστή αυξάνει με την ικανότητα αυτού σε kVA, διότι αυτή αυξάνει ταχύτερα σε σχέση με τις απώλειες. Εντούτοις, οι απώλειες ανά μονάδα επιφανείας αυξάνουν, διότι οι επιφάνειες αυξάνονται με το τετράγωνο της σχέσεως. Καθώς αυξάνεται η ικανότητα του μετασχηματιστή, καθίσταται επιτακτική η περισσότερο αποδοτική μετάδοση θερμότητας.

Με βάση τα ανωτέρω, στις διάφορες περιοχές ικανότητας των μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι ψύξεως με τα αντίστοιχα κιβώτια.

- Μετασχηματιστές πολύ μικρής ικανότητας μέχρι 30 kVA έχουν λεία κιβώτια που είναι και τα απλούστερα. Μεγαλύτερη επιφάνεια επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση κυματοειδούς ελάσματος για τα τοιχώματα του κιβωτίου.
- Για μετασχηματιστές μικρής ικανότητας, μέχρι 3000 kVA, χρησιμοποιούνται κιβώτια εφοδιασμένα με σωλήνες διατεταγμένους σε μια μέχρι τρεις σειρές και συγκολλημένους επί του λείου κιβωτίου με κατακόρυφη τοποθέτηση. Μέσα στους σωλήνες, το θερμό λάδι που ανέρχεται στο κιβώτιο λαδιού τρέχει προς τα κάτω αποδίδοντας μέρος της θερμότητάς του στον περιβάλλοντα αέρα και έτσι αφού ψυχθεί επανέρχεται στο κιβώτιο.
- Μετασχηματιστές μέσης ικανότητας, μέχρι 10000 kVA, είναι εφοδιασμένοι με ψυγεία ακτινοβολίας (radiators), τα οποία λαμβάνουν το θερμό λάδι από το πάνω μέρος του κιβωτίου και το επαναφέρουν στο κάτω μέρος αυτού μετά την ψύξη. Τα ψυγεία ακτινοβολίας μπορούν να διαταχθούν πάνω στην μια πλευρά ή πάνω και στις δυο πλευρές του μετασχηματιστή.
- Σε μετασχηματιστές μεγάλης ικανότητας, πάνω από 10000 kVA χρησιμοποιείται ψύξη με ψυγεία ακτινοβολίας, στα οποία εμφυσάται αέρας με ανεμιστήρες ή με τεχνητή έλξη. Στους μεγάλους μετασχηματιστές χρησιμοποιείται επίσης η ψύξη με νερό κατά την οποία το θερμό λάδι τίθεται σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία μέσω ψυγείου νερού το οποίο διατάσσεται εκτός του κιβωτίου λαδιού.

Το κανονικό λάδι των μετασχηματιστών έχει μεν εξαιρετική μονωτική ικανότητα και για αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι μπορεί να καεί και να γίνει παράγοντας για ισχυρή φλόγα και θερμότητα. Για αυτό στις θέσεις εγκαταστάσεως των μετασχηματιστών, ανάλογα με το μέγεθός τους και με το αν εγκαθίστανται σε κλειστούς ή ανοικτούς χώρους, προβλέπονται από τους κανονισμούς ειδικές διαμορφώσεις των δαπέδων, ώστε σε

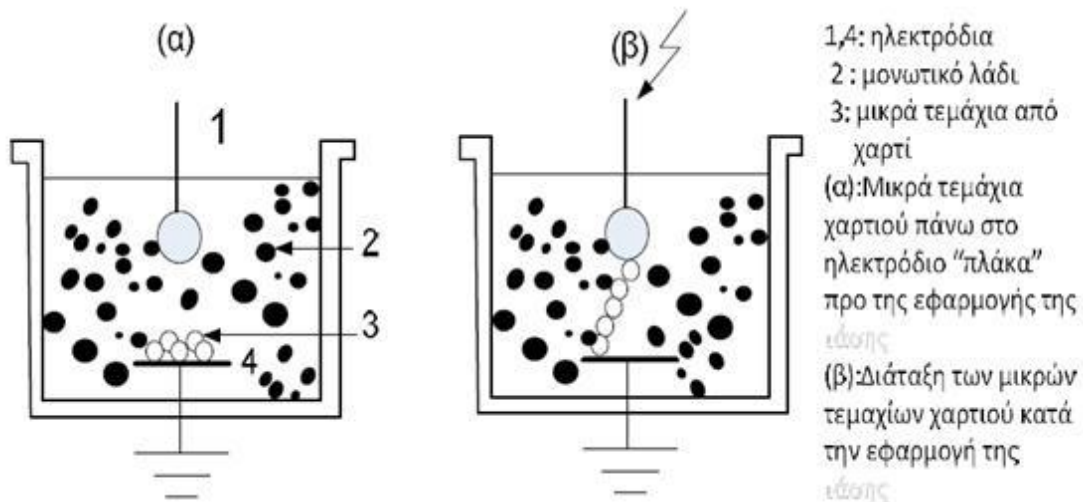
περίπτωση διαρρήξεως του κιβωτίου και εκροής ή και αναφλέξεως του λαδιού, αυτό να απάγεται, χωρίς να δημιουργεί κινδύνους μεταδόσεως της φωτιάς. Επί πλέον οι ατμοί του λαδιού, αναμιγνυόμενοι με τον ατμοσφαιρικό αέρα, είναι δυνατό να προκαλέσουν εκρηκτικό μίγμα με αποτέλεσμα υπό ορισμένες συνθήκες να προκληθεί ισχυρή έκρηξη.

Για τους παραπάνω λόγους έχουν χρησιμοποιηθεί ορισμένα άφλεκτα συνθετικά λάδια, γνωστά με τα εμπορικά τους ονόματα Pyralol, Askarel, Inerteen, Chronextol κ.ά. Τελευταία όμως έχουν διατυπωθεί σοβαρές επιφυλάξεις για την χρησιμοποίησή τους, λόγω δυσμενών επιδράσεων που μπορούν να έχουν επί της υγείας των ανθρώπων που τα χειρίζονται.

Όσον αφορά στους μετασχηματιστές με ψύξη αέρα, παρουσιάζουν το μειονέκτημα του μεγάλου όγκου και για αυτό χρησιμοποιούνται μόνον σε μικρά μεγέθη και μάλιστα για χαμηλές τάσεις, αφού για υψηλές τάσεις μπορεί να προκληθούν ανωμαλίες από την επικάθιση της σκόνης του αέρα επί των τυλιγμάτων, οπότε δυσχεραίνεται η απαγωγή της θερμότητας.

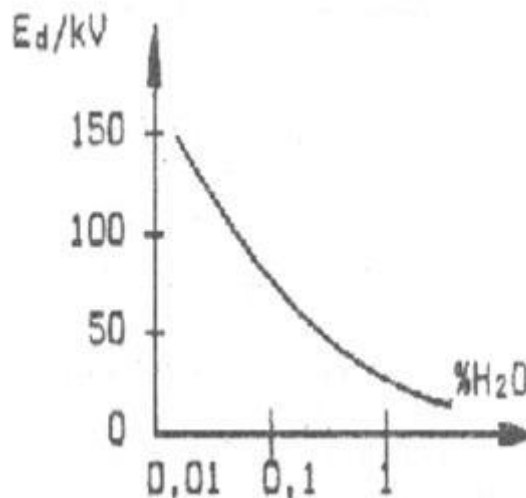
1.6 Το μονωτικό λάδι των μετασχηματιστών

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού λαδιού (και γενικότερα των υγρών μονωτικών) αποδίδονται στους παράγοντες, που αναφέρθηκαν στα στερεά μονωτικά, αλλά και στα αιωρούμενα σε αυτά ξένα σωματίδια, τα οποία σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες. Η δημιουργία των παραπάνω αγώγιμων γεφυρών μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά (σχήμα 1.6-1: τα μικρά τεμάχια από χαρτί διατάσσονται, κατά την εφαρμογή της τάσης, μεταξύ των ηλεκτροδίων). Η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού μειώνεται σημαντικά όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα.



Σχήμα 1.6-1: Δημιουργία γέφυρας από μικρά τεμάχια χαρτιού μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η υγρασία προκαλεί επίσης δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού, όπως φαίνεται σχήμα 1.6-2.

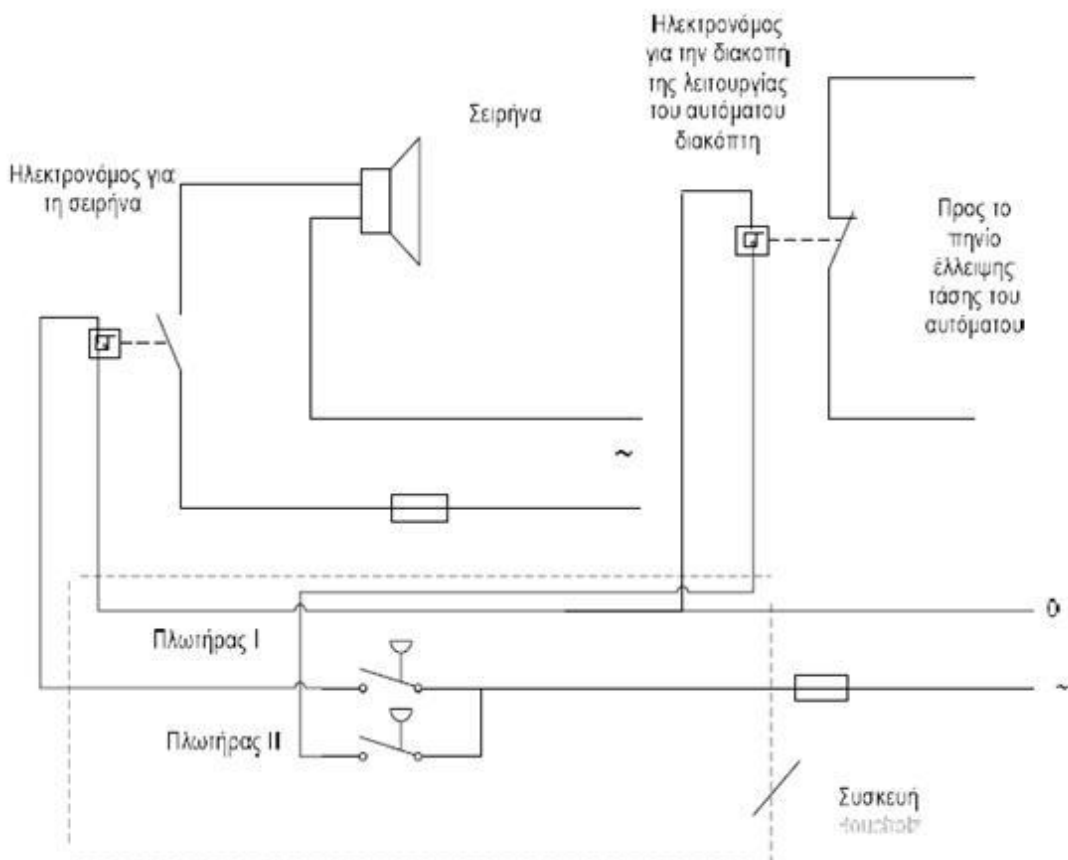


Σχήμα 1.6-2: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού ανάλογα με το ποσοστό του νερού

1.6.1 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται (κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών) μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και την συσκευή Buchholz, που πρέπει να περιλαμβάνει ο μετασχηματιστής. Ο αφυγραντήρας τοποθετείται επί του δοχείου διαστολής του μετασχηματιστή. Περιέχει υλικό (το siticagel), που απορροφά την υγρασία. Από το γυάλινο μέρος του δοχείου του αφυγραντήρα παρακολουθεί κανείς το χρώμα του siticagel. Όταν το χρώμα είναι γαλάζιο, τότε το υλικό αυτό έχει τη δυνατότητα απορρόφησης υγρασίας. Όταν το χρώμα γίνει κόκκινο, τότε το παραπάνω υλικό είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση (3 έως 6 ώρες σε θερμοκρασία 140 °C το πολύ).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Buchholz (σχήμα 1.6.1-1) βασίζεται στα αέρια, που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Buchholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I και II). Όταν ο χώρος του Buchholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοικτές επαφές.



Σχήμα 1.6.1-1: Κύκλωμα της προστασίας Buchholz.

Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Buchholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό, κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Buchholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών). Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων.

Μια μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του ηλεκτρομονωτικού ελαίου, που εφαρμόζεται από τις εταιρείες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγομένων αερίων (κυρίως: υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και στις σχετικές ποσότητές τους, οι οποίες εντοπίζονται μέσω χρωματογράφου αερίων. Μία μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό ως ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται βασικές οδηγίες για τη συντήρηση των μετασχηματιστών ελαίου, που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους.

Χρονικό Διάστημα	Είδος Συντήρησης
Σε 3 μήνες (μηνιαίως*)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Έλεγχος στάθμης λαδιού 2. Έλεγχος θερμοκρασίας 3. Έλεγχος υγρασίας από τον αφυγραντήρα 4. Εξωτερικά μέρη και ειδικότερα οι μονωτήρες καθαρίζονται από σκόνη κλπ. 5. Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Ετησίως (σε 6 μήνες*)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού (**) 2. Έλεγχος της προστασίας του μετασχηματιστή 3. Έλεγχος και σύσφιξη λυόμενων συνδέσμων 4. Λίπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) 5. Έλεγχος πυροσβεστήρων
Σε 2 έτη	Αλλαγή ρουλιών κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Σε 5 έτη	Πλήρης έλεγχος του λαδιού και σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αλλαγή

Πίνακας 1.6.1-1: Οδηγίες συντήρησης μετασχηματιστών ελαίου

* Σε τσιμεντοβιομηχανίες, λατομεία και γενικά σε περιβάλλον που οδηγεί σε δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

** Ένα λίτρο σε τελείως στεγνό και καθαρό δοχείο.

2. Σκοπός της Εργασίας

Από τα παραπάνω, φαίνεται η αναγκαιότητα ύπαρξης πυροπροστασίας στους μετασχηματιστές. Είναι φανερό, ότι εμφανίζονται πολλές δυσκολίες και προβλήματα στην περίπτωση της πυρκαγιάς ενός μετασχηματιστή, τόσο για το μετασχηματιστή, ως συσκευή στο ηλεκτρικό δίκτυο, όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος εξοπλισμού, αλλά και για την προστασία της ζωής των ατόμων που εργάζονται σε χώρους που συμπεριλαμβάνονται μετασχηματιστές.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι η συλλογή επιστημονικών απόψεων πάνω στο αντικείμενο της προστασίας του μετασχηματιστή, με μεγαλύτερη έμφαση στην πυροπροστασία του μετασχηματιστή. Για το σκοπό αυτό, έγινε διερεύνηση στη διεθνή βιβλιογραφία.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην έρευνα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας, βρέθηκαν αρκετές εργασίες πάνω στο αντικείμενο της πυροπροστασίας μετασχηματιστών. Από αυτές, θεωρήθηκαν σημαντικότερες, αυτές που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Στην πρώτη, γίνεται λόγος για την πυροπροστασία κατά τη συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις εντολών, επικοινωνιών, υπολογιστών, πληροφοριών, παρακολούθησης και αναγνώρισης [6].

Στη δεύτερη, συζητούνται τα συστήματα πυροπροστασίας μετασχηματιστών και η πυρανίχνευση, κατά το μηχανολογικό σχεδιασμό υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας [7].

Στην τρίτη αναφέρονται τα πυρίμαχα ρευστά για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές, με βάση μια δημοσίευση που έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 [8].

Στην τέταρτη γίνεται λόγος για την ανάπτυξη ενός Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου και το σχεδιασμό ενός συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, Σ.Α.Τ.Υ.Φ. και δοχείου μονωτικού ελαίου [9].

Στην πέμπτη περιγράφεται ένα σύστημα πρόληψης και εξάλειψης πυρκαγιάς για μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30MVA, 110kV/27kV, που εφαρμόζεται στο προαστιακό τμήμα του Mumbai [10].

Στην έκτη γίνεται λόγος για την πυροπροστασία μετασχηματιστών ισχύος με ένα σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού [11].

Τέλος, στην έβδομη, γίνεται μία εκτίμηση κινδύνου πυροπροστασίας μετασχηματιστή, με βάση τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, για ένα τυπικό πολυώροφο κτίριο της Νέας Ζηλανδίας [12].

3.1 Συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις εντολών, επικοινωνιών, υπολογιστών, πληροφοριών, παρακολούθησης και αναγνώρισης: πυροπροστασία

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφονται τα συστήματα πυροπροστασίας γενικά, τα συστήματα πυρανίχνευσης, καθώς και τα συστήματα καταστολής της πυρκαγιάς, τα οποία είναι δημοσιευμένα στο τεχνικό εγχειρίδιο του Γενικού Επιτελείου του στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, στο τμήμα του Στρατού Ξηράς [6].

Στην αρχή γίνεται λόγος για τις γενικές αρχές ενός συστήματος πυροπροστασίας. Κατόπιν, γίνεται λόγος για την λεγόμενη «πρώτη γραμμή άμυνας», η οποία είναι το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς έγκαιρης προειδοποίησης και αναλύονται οι τύποι ανιχνευτών και το σύστημα σηματοδοσίας, ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση μιας πυρκαγιάς, ακόμη και σε απομακρυσμένη τοποθεσία. Τέλος, γίνεται λόγος για τα συστήματα καταστολής της πυρκαγιάς, με ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα νερού, στα συστήματα διοξειδίου του άνθρακα, στα πυροσβεστικά συστήματα αφρού και στους φορητούς πυροσβεστήρες.

3.1.1 Γενικά συστήματα πυροπροστασίας

Το σύστημα πυροπροστασίας αποτελείται από βασικά συστήματα καταστολής πυρκαγιάς, όπως οι αυτόματοι ψεκαστήρες και τα συστήματα διοξειδίου του άνθρακα, καθώς επίσης και ανιχνευτές πυρκαγιάς και συστήματα συναγερμών. Ο σκοπός του συστήματος καταστολής πυρκαγιάς είναι να προστατεύει την ιδιοκτησία και τη ζωή από τις συνέπειες μιας πυρκαγιάς και να παρέχει έλεγχο της πυρκαγιάς, έως ότου φθάσουν οι επαγγελματίες πυροσβέστες. Το αν η καύση ελέγχεται ή εξαφανίζεται από το σύστημα καταστολής, εξαρτάται από τον κίνδυνο ενάντια του οποίου παρέχεται προστασία, τον τύπο συστήματος που έχει επιλεγεί να προστατεύει από τον κίνδυνο, τον τύπο καταστολέα που έχει επιλεγεί και, σημαντικότερα, από το σχεδίαση του συστήματος καταστολής. Είναι επιτακτικό να ζητείται η συμβουλή των πρότυπων κώδικα πυρκαγιάς της Εθνικής Ένωσης Πυροπροστασίας (NFPA) και να λαμβάνονται υπόψη οι συστάσεις του κατασκευαστή σχετικά με κάθε καταστολή, ανίχνευση και σύστημα συναγερμών, προτού να εκτελεσθεί οποιαδήποτε λειτουργία ή συντήρηση σε οποιαδήποτε από αυτά τα συστήματα.

3.1.2 Συστήματα πυρανίχνευσης

Η έννοια της υπεράσπισης σε βάθος, εφαρμόζεται στην πυροπροστασία, όταν ένα σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς έγκαιρης προειδοποίησης χρησιμοποιείται για να διαβιβάσει τη θέση εγκαταστάσεων ή εξοπλισμού σε μια κεντρική θέση ή στο αρμόδιο προσωπικό. Η πρώτη γραμμή άμυνας είναι το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς έγκαιρης προειδοποίησης, σχεδιασμένο να ανιχνεύει τα μόρια της καύσης, που διαμορφώνονται προτού να εμφανιστούν τα προφανή σημάδια της πυρκαγιάς, ακολουθούμενο από συστήματα σχεδιασμένα να ανιχνεύουν την πυρκαγιά και να απελευθερώσουν τους κατασβεστήρες. Ο σκοπός του συστήματος είναι να παρέχει την πιο έγκαιρη πιθανή προειδοποίηση ενός πιθανού κινδύνου πυρκαγιάς, κυρίως από την εκτενή χρήση των ανιχνευτών καπνού ιονισμού.

3.1.2.1 Τύποι ανιχνευτών

Οι τρεις βασικοί τύποι ανιχνευτών μπορούν να ανιχνεύσουν: τον **καπνό**, τη **θερμότητα** και τη **φλόγα**.

Ο τύπος ιονισμού και ο φωτοηλεκτρικός, είναι δύο τύποι **ανιχνευτών καπνού** που χρησιμοποιούνται. Οι ανιχνευτές καπνού ιονισμού περιέχουν ένα μικρής ποσότητας ραδιενεργό υλικό, που ιονίζει τον αέρα στον θάλαμο αισθητήρων, καθιστώντας τον κατά συνέπεια αγωγίμο και επιτρέποντας μια ροή ρεύματος, μέσω του αέρα, μεταξύ δύο φορτισμένων ηλεκτροδίων. Όταν τα μόρια καπνού εισέρχονται στην περιοχή ιονισμού, το κύκλωμα ανιχνευτών αποκρίνεται με έναν συναγερμό ή βουητό. Οι φωτοηλεκτρικοί ανιχνευτές καπνού περιέχουν ένα θάλαμο που έχει είτε επικαλυπτόμενες είτε πορώδεις στρώσεις φωτός, που επιτρέπει την είσοδο καπνού. Η μονάδα περιέχει μια πηγή φωτός και ένα ειδικό φωτοευαίσθητο κύτταρο στο συσκοτισμένο θάλαμο. Το κύτταρο είτε τοποθετείται στο θάλαμο σε

διαφορετική γωνία από την πορεία του φωτός, είτε έχει το φως αποκλεισμένο από το ίδιο με κάποιο εμπόδιο φωτός ή με μια ασπίδα που τοποθετείται μεταξύ της πηγής φωτός και του κυττάρου. Με την αποδοχή των μορίων καπνού, το φως χτυπά τα μόρια και σκεδάζεται και αντανακλάται στο φωτοευαίσθητο κύτταρο. Αυτό αναγκάζει το φωτοαισθητήριο κύκλωμα να αποκρίνεται στην παρουσία μορίων καπνού στο θάλαμο καπνού.

Οι **ανιχνευτές θερμότητας** μπορούν να διαμορφωθούν ως σημειακού τύπου ή γραμμικού τύπου. Στους ανιχνευτές σημειακού τύπου, το αισθητήριο στοιχείο εστιάζει σε μια συγκεκριμένη θέση. Οι ανιχνευτές γραμμικού τύπου αισθάνονται τις μεταβολές θερμοκρασίας μέσω του μήκους ενός μεταλλικού καλωδίου. Όταν η θερμότητα φθάνει επάνω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο στις γραμμές που είναι δεμένες σε όλη τη περιοχή υπό προστασία, ενεργοποιείται ένας συναγερμός ή συναγερμός μαζί με ένα σύστημα καταστολής πυρκαγιάς. Οι ανιχνευτές θερμότητας είναι τύπου καθορισμένης θερμοκρασίας, αντιστάθμισης τιμής θερμοκρασίας, ή ρυθμού ανόδου θερμοκρασίας. Ένας ανιχνευτής καθορισμένης θερμοκρασίας είναι μια συσκευή, που αποκρίνεται όταν το λειτουργικό στοιχείο του θερμαίνεται σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο ή υψηλότερο. Ένας ανιχνευτής αντιστάθμισης τιμής θερμοκρασίας είναι μια συσκευή που αποκρίνεται όταν η θερμοκρασία του αέρα που περιβάλλει τη συσκευή φθάνει σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο, ανεξάρτητα από το ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας. Ένας ανιχνευτής ρυθμού ανόδου θερμοκρασίας είναι μια συσκευή που αποκρίνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται με ένα ρυθμό που ξεπερνά μία προκαθορισμένη τιμή.

Ένας **ανιχνευτής φλόγας** είναι μια συσκευή που αποκρίνεται στην εμφάνιση ενέργειας ακτινοβολίας ορατής στο ανθρώπινο μάτι ή στην ενέργεια ακτινοβολίας έξω από το εύρος της ανθρώπινης οράσεως:

- Ένας φωτοηλεκτρικός ανιχνευτής φλόγας είναι μια συσκευή που το αισθητήριο στοιχείο είναι ένα φωτοκύτταρο, που είτε αλλάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητά του, είτε παράγει ένα ηλεκτρικό δυναμικό, όταν εκτίθεται σε ενέργεια ακτινοβολίας.
- Ένας ανιχνευτής φλόγας τρεμοπαίγματος (flickering) είναι ένας φωτοηλεκτρικός ανιχνευτής φλόγας, με σκοπό να αποτρέπει την απόκριση στο ορατό φως, εκτός αν το παρατηρούμενο φως είναι διαμορφωμένο σε μια συχνότητα χαρακτηριστική του flickering μιας φλόγας.
- Ένας υπέρυθρος ανιχνευτής είναι μια συσκευή με ένα αισθητήριο στοιχείο που ανταποκρίνεται στην ενέργεια ακτινοβολίας έξω από το εύρος της ανθρώπινης οράσεως (στην περιοχή του υπέρυθρου).
- Ένας υπεριώδης ανιχνευτής είναι μια συσκευή με ένα αισθητήριο στοιχείο που ανταποκρίνεται στην ενέργεια ακτινοβολίας έξω από το εύρος της ανθρώπινης οράσεως (στην περιοχή του υπεριώδους).

3.1.2.2 Συστήματα σηματοδότησης

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός απομακρυσμένου πολυσύνθετου συστήματος για την ανίχνευση πυρκαγιάς, είναι η ευκολία της

προσθήκης ανιχνευτών συναγερμών, χωρίς την απαίτηση αγωγού μεγάλου μήκους και πολλαπλών καλωδίων σε όλη την εγκατάσταση. Το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς έγκαιρης προειδοποίησης, μπορεί να είναι ένα, κατηγορίας A, ιδιόκτητο προστατευτικό σύστημα σημάτων, που καλύπτει τις απαιτήσεις NFPA 72, εθνικού κώδικα συναγερμού πυρκαγιάς. Η ανίχνευση πυρκαγιάς κατηγορίας A, σημαίνει ότι ένας συναγερμός πυρκαγιάς μπορεί να ληφθεί και να επιδειχθεί στον κεντρικό σταθμό συναγερμών, στην μη ομαλή παρουσία μιας μόνο διακοπής ενός επίγειου σφάλματος σε οποιοδήποτε κύκλωμα σηματοδότησης. Ένα σύστημα κατηγορίας B δεν περιλαμβάνει αυτό το λειτουργικό χαρακτηριστικό έκτακτης ανάγκης.

3.1.3 Συστήματα καταστολής πυρκαγιάς

Πολλοί τύποι καταστολής πυρκαγιάς ή συστήματα κατάσβεσης είναι διαθέσιμα. Λόγω της περιβαλλοντικής επίδρασης, τα συστήματα καταστολής πυρκαγιάς Halon 1301 δεν επιτρέπονται πλέον. Ο ψεκασμός νερού παρέχει δράση ψύξης, το CO₂ μειώνει τη συγκέντρωση οξυγόνου, η απομόνωση αφαιρεί το καύσιμο από την πυρκαγιά και οι ξηρές χημικές ουσίες διαταράσσουν την ασυγκράτητη χημική αλυσωτή αντίδραση που απαιτείται για την καύση. Ωστόσο, δεν είναι όλοι οι κατασβεστήρες εξίσου αποτελεσματικοί και οικονομικά αποδοτικοί σε ορισμένους τύπους πυρκαγιών. Το νερό που χρησιμοποιείται στον εξοπλισμό ηλεκτρικού ελέγχου και σε τερματικούς θαλάμους, μπορεί να προκαλέσει ζημιά βραχυκύκλωσης. Το CO₂ δεν είναι οικονομικά αποδοτικό σε περιοχές μεγάλου όγκου, ενώ η περιοχή δεν είναι αμέσως κατοικήσιμη μετά από την εφαρμογή. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί, είναι εάν το σύστημα καταστολής θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί με αυτόματα ή χειρωνακτικά μέσα. Οι συνέπειες ενός λανθασμένου σφάλματος ενός αυτόματου συστήματος μπορεί να είναι τόσο κακές, όσο μια πυρκαγιά, ενώ το προσωπικό πρέπει να απενεργοποιήσει το σύστημα για να αποκλείσει περαιτέρω σφάλματα.

3.1.3.1 Συστήματα νερού

Η προστασία των εγκαταστάσεων από την πυρκαγιά απαιτεί συχνά την εγκατάσταση ενός συστήματος ψεκαστήρων. Ο εξοπλισμός, που αποτελείται από υπερυψωμένη σωλήνωση και συνημμένους ψεκαστήρες που συνδέονται με μια αυτόματη παροχή νερού, προστατεύει τον καθορισμένο χώρο και από μία ποικιλία από κινδύνους. Υπάρχουν τέσσερις σημαντικοί τύποι συστημάτων ψεκαστήρων: **υγρός σωλήνας, ξηρός σωλήνας, κατακλυσμός και προ-ενέργειας (pro-action)**.

Το **υγρό σύστημα σωλήνων** είναι το απλούστερο και το πιο κοινό. Το υγρό σύστημα σωλήνων χρησιμοποιεί ένα γεμάτο με νερό σύστημα σωληνώσεων, που συνδέεται με μια παροχή νερού και είναι εξοπλισμένο με ψεκαστήρες, με καθορισμένα στοιχεία θερμοκρασίας, που κάθε ένα ανοίγει χωριστά όταν εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία λόγω μιας πυρκαγιάς. Οι περιοχές όπου τα συστήματα ψεκαστήρων υγρού σωλήνα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι θερμαινόμενα καταστήματα, γκαράζ, αποθήκες εμπορευμάτων, εργαστήρια, γραφεία, δωμάτια αρχείων, αποδυτήρια, χώροι γεύματος και τουαλέτες.

Ο τύπος συστήματος **ξηρού σωλήνα** έχει ψεκασθήρες που λειτουργούν με θερμότητα, συνδεδεμένους σε ένα σύστημα σωληνώσεων που περιέχει αέρα υπό πίεση. Όταν λειτουργήσει η κεφαλή ενός ψεκαστήρα, η πίεση του αέρα μειώνεται, μια βαλβίδα «ξηρών σωλήνων» ανοίγει από την πίεση του νερού και το νερό ρέει σε οποιουσδήποτε ανοιγμένους ψεκασθήρες.

Ο τύπος συστήματος **κατακλυσμού** αποτελείται από ψεκασθήρες ανοικτού-τύπου, που συνδέονται με ένα δίκτυο ξηρής σωλήνωσης (μη γεμάτης με νερό), το οποίο ελέγχεται αυτόματα από ένα πλήρως εποπτευμένο σύστημα ανίχνευσης φωτιάς, που χρησιμεύει επίσης ως σύστημα συναγερμού πυρκαγιάς. Όταν ανιχνεύεται μια πυρκαγιά, μια αυτόματη βαλβίδα κατακλυσμού ανοίγει, εισάγοντας νερό στο σύστημα, για να εκκενώσει μέσω όλων των ψεκασθήρων. Το σύστημα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε χωριστά ελεγχόμενους αγωγούς, ανάλογα με την περιοχή που πρέπει να καλυφθεί και τον αριθμό των ψεκασθήρων που απαιτούνται. Η συνηθισμένη πίεση που απαιτείται στους ψεκασθήρες είναι περίπου 175 psi και η σωλήνωση πρέπει να διαστασιοποιηθεί κατάλληλα. Τα συστήματα ψεκασθήρων κατακλυσμού παρέχονται όπου απαιτούνται σε ανοιχτές περιοχές και σε περιοχές που απαιτούν προστασία της σωλήνωσης από την ψύξη. Τα συστήματα κατακλυσμού νερού παρέχονται για τους εξωτερικούς μετασχηματιστές, όταν οι μετασχηματιστές εγκαθίστανται πάνω ή δίπλα στην κατασκευή, για να βοηθήσουν να αποτραπεί η διάδοση της πυρκαγιάς και να περιορίσουν τη ζημιά στη δομή και σε άλλους κοντινούς μετασχηματιστές και εξοπλισμό.

Ο τύπος συστήματος **προ-ενέργειας** είναι παρόμοιος με το ανωτέρω σύστημα κατακλυσμού ψεκασμού νερού, εκτός από το ότι αυτό περιέχει τμήματα ψεκασθήρων κλειστού τύπου, που αδειάζουν το νερό μόνο μέσω εκείνων των ψεκασθήρων των οποίων τα καθορισμένα στοιχεία θερμοκρασίας έχουν ανοίξει από τη θερμότητα μιας πυρκαγιάς.

3.1.3.2 Διοξείδιο του άνθρακα

Αυτός ο τύπος συστήματος αποτελείται, συνήθως, από μια γεμισμένη δεξαμενή αποθήκευσης παγωμένου υγρού διοξειδίου του άνθρακα, χαμηλής πίεσης, με αισθητήρες ελέγχου θερμοκρασίας, για να επιτρέπεται η αυτόματη έγχυση του – μόνιμα διοχετευμένου στους σωλήνες – διοξειδίου του άνθρακα στις περιοχές που πρέπει να προστατευτούν. Το σύστημα περιλαμβάνει συνήθως συναγερμούς προειδοποίησης, για να προειδοποιήσει το προσωπικό όποτε το διοξείδιο του άνθρακα εγχέεται σε μια ενεργοποιημένη περιοχή. Τα συστήματα εξάλειψης πυρκαγιάς διοξειδίου του άνθρακα, αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται για να εξαφανίσουν τις πυρκαγιές αποθηκών άνθρακα και χρησιμοποιούνται στις περιοχές ηλεκτρικού κινδύνου, όπως οι χώροι μπαταριών, οι χώροι ηλεκτρονόμων, οι χώροι μηχανισμών διανομής, οι χώροι υπολογιστών και μέσα στα ηλεκτρικά ντουλάπια.

3.1.3.3 Πυροσβεστικά συστήματα αφρού

Τα πυροσβεστικά συστήματα αφρού χρησιμοποιούν ένα διάλυμα παραγωγής αφρού, το οποίο διανέμεται από σωλήνες με ακροφύσια ψεκασμού ή από έναν θάλαμο αποθήκευσης αφρού, για την αποβολή του αφρού και την εξάπλωση του στην περιοχή ώστε να προστατευτεί. Χρησιμοποιείται, κυρίως, για να διαμορφώσει ένα κάλυμμα πάνω από τα εύφλεκτα και καύσιμα υγρά, το οποίο σβήνει (ή αποτρέπει) μια πυρκαγιά, με τον αποκλεισμό του αέρα και την ψύξη των καυσίμων. Ο αφρός παράγεται συνήθως με τη μίξη ποσών ανάλογων του τρία τοις εκατό (3%) διπλής ικανότητας, τυποποιημένου συμπυκνωμένου αφρού χαμηλής εξάπλωσης, χρησιμοποιώντας μια κατάλληλα ρυθμισμένη συσκευή εισαγωγής, με (ή χωρίς) μια δεξαμενή αποθήκευσης-ρύθμισης αναλογίας αφρού, για να αναμιγνύει το συμπυκνωμένο αφρό με ένα ρεύμα νερού από έναν αγωγό νερού για πυρκαγιά. Μία δεξαμενή αφρού ή ανοικτοί ψεκαστήρες, αντλούν τον αέρα για να διαμορφώσουν αφρό ώστε να σκεπάσει την περιοχή που προστατεύεται. Η βαλβίδα κατακλυσμού του νερού στο σύστημα, μπορεί να ανοίγει είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα. Τα συστήματα αφρού εγκαθίστανται στις εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος, για να προστατεύουν τις περιοχές πετρελαίου, τα συστήματα πετρελαίου λίπανσης, και τα συστήματα πετρελαίου στεγανωμένα με υδρογόνο (hydrogen seal oil systems).

3.1.3.4 Φορητοί πυροσβεστήρες

Φορητοί πυροσβεστήρες χειρός CO₂ θα πρέπει να παρέχονται και να τοποθετούνται σε όλη την εγκατάσταση, σύμφωνα με το NFPA. Η χρήση των πυροσβεστήρων ξηρών χημικών δεν συστήνεται, κυρίως λόγω των προβλημάτων καθαρισμού.

3.2 Μηχανολογικός σχεδιασμός υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας: συστήματα πυροπροστασίας μετασχηματιστών και πυρανίχνευση

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφονται τα συστήματα πυροπροστασίας μετασχηματιστών, καθώς και τα συστήματα πυρανίχνευσης, τα οποία είναι δημοσιευμένα στο εγχειρίδιο μηχανικών του σώματος μηχανικών στρατού ξηράς των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής [7].

Στην αρχή γίνεται λόγος για την εγκατάσταση ενός συστήματος πυροπροστασίας γενικά για τους μετασχηματιστές. Κατόπιν, γίνεται διάκριση ανάμεσα στα είδη των μετασχηματιστών και στα πρότυπα που πρέπει να ακολουθούνται για την πυροπροστασία αυτών. Τέλος, γίνεται λόγος για τα συστήματα ανίχνευσης της πυρκαγιάς.

3.2.1 Πυροπροστασία μετασχηματιστών

Η πυροπροστασία σε έναν μετασχηματιστή παρέχεται για να περιορίσει τη ζημιά σε άλλους κοντινούς μετασχηματιστές, εξοπλισμό και κατασκευές. Τα συστήματα κατακλυσμού παρέχονται για τους υπαίθριους μετασχηματιστές ελαίου και τα συστήματα CO₂ για τους εσωτερικούς μετασχηματιστές ελαίου.

3.2.1.1 Υπαίθριοι – εσωτερικοί μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές ισχύος βρίσκονται συνήθως υπαίθρια, ή σε εγκαταστάσεις περικλεισμένες. Μερικές φορές είναι ημι-απομονωμένοι, με τοίχους σε τρεις πλευρές. Η συχνότητα των πυρκαγιών μετασχηματιστών είναι εξαιρετικά χαμηλή, αλλά οι μεγάλες ποσότητες ελαίου που περιλαμβάνονται και η απουσία άλλων αποτελεσματικών μέτρων ελέγχου πυρκαγιάς, δικαιολογούν την εγκατάσταση ενός συστήματος κατακλυσμού, όπου υπάρχει κίνδυνος στην κατασκευή.

Όσον αφορά στη σχεδίαση του συστήματος, το σύστημα πρέπει να είναι ξηρού σωλήνα, τύπου κατακλυσμού. Οι βαλβίδες κατακλυσμού, πρέπει να ενεργοποιούνται αυτόματα από έναν θερμοστάτη, χειροκίνητα από ένα διακόπτη σε κουτί με υαλώδες τζάμι που σπάει, που βρίσκεται σε μια ασφαλή θέση κοντά στο μετασχηματιστή, ή χειροκίνητα στη βαλβίδα. Στην περίπτωση όπου οι εκτεθειμένοι μετασχηματιστές (χωρίς τοίχους απομόνωσης) είναι τοποθετημένοι μεταξύ τους σε απόσταση μικρότερη από 2,5 φορές το ύψος του μετασχηματιστή ή 9m, το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί για να ψεκάζει τους γειτονικούς μετασχηματιστές ταυτόχρονα με εκείνον στον οποίο ξεκίνησε ο κατακλυσμός. Η λεπτομερής σχεδίαση του συστήματος πρέπει να είναι σε συμφωνία με τα πρότυπα NFPA 851 και 15.

Οι εσωτερικοί μετασχηματιστές ελαίου πρέπει να προστατευθούν σύμφωνα με τον εθνικό ηλεκτρικό κώδικα NFPA 70.

3.2.1.2 Εξωτερικός μετασχηματιστής ελαίου

Οι εξωτερικοί μετασχηματιστές ισχύος ελαίου πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με φρεάτια ψύξης, που αποτελούνται από μια λεκάνη συλλογής, κάτω από το μετασχηματιστή, γεμισμένα με τραχύ ψιλό πετραδάκι (coarse crushed stone), ποσότητας ικανής για να αποφευχθεί μια πυρκαγιά ελαίου σε περίπτωση διάρρηξης του κιβωτίου.

3.2.2 Ανιχνεύσεις

Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφονται: η χρήση των θερμικών ανιχνευτών, των ανιχνευτών ιονισμού, των φωτοηλεκτρικών ανιχνευτών, η τοποθεσία των ανιχνευτών, η αξιοπιστία και το σύστημα συναγερμού τους.

Οι **θερμικοί ανιχνευτές** ταιριάζουν καλύτερα σε τοποθεσίες μέσα σε εξοπλισμό όπως οι γεννήτριες ή τα κοντινά εύφλεκτα ρευστά.

Οι **ανιχνευτές ιονισμού** είναι καταλληλότεροι για τα αέρια που εκπέμπονται με την υπερθέρμανση, όπως στα ηλεκτρικά καλώδια ή σε μια πυρκαγιά που σιγοκαίει. Η θέση κοντά σε εξοπλισμό που παράγει ηλεκτρικό τόξο πρέπει να αποφευχθεί. Δεν είναι κατάλληλοι για την ενεργοποίηση συστημάτων CO₂.

Οι **φωτοηλεκτρικοί ανιχνευτές** είναι καταλληλότεροι για τα μόρια που εκπέμπονται από μια πυρκαγιά, που προκαλείται από αποτυχία του συστήματος σε ηλεκτρικά καλώδια. Η χρήση τους στις ελαστικές τοποθεσίες, με ανιχνευτές ιονισμού κατά μήκος μιας εγκατάστασης καλωδίων, θα παρείχε την πιο έγκαιρη ανίχνευση. Δεν είναι κατάλληλοι για την ενεργοποίηση συστημάτων CO₂.

Όσον αφορά στην **τοποθεσία**, οι ανιχνευτές πρέπει να τοποθετηθούν ακριβώς ή κοντά στην πιθανή πηγή πυρκαγιάς. Στις περιοχές όπου τα καύσιμα υλικά δεν είναι κανονικά παρόντα, όπως οι χαμηλότερες αίθουσες επιθεώρησης, καμία κάλυψη δεν μπορεί να είναι κατάλληλη.

Σε ότι έχει να κάνει με την **αξιοπιστία**, είναι απαραίτητη η πιο έγκαιρη «αξιόπιστη» ανίχνευση. Ο τύπος ή οι τύποι ανιχνευτών, η τοποθεσία και η ρύθμισή τους, πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά. Η ρύθμιση της ευαισθησίας των ανιχνευτών, πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να εξαλείφει όλους τους αναληθείς συναγερμούς. Ένα σύστημα ανιχνευτών πυρκαγιάς πρέπει να παρέχεται στις αίθουσες καλωδίων και στα δωμάτια διακλάδωσης τους, σε όλα τα εργοστάσια παραγωγής.

Το σύστημα ανακοινώσεων της εγκατάστασης, καθώς και το **σύστημα συναγερμού** και, εφόσον είναι εφαρμόσιμο, το ασύρματο σύστημα συναγερμού, πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να ελέγχουν τους συναγερμούς πυρανίχνευσης. Ένα σύστημα συναγερμού πρέπει να παρέχεται για κάθε περιοχή. Εφόσον είναι κατάλληλα εφαρμοσμένα, αυτά τα συστήματα θα παρέχουν πιο αξιόπιστα και χρήσιμα στοιχεία συναγερμού, σε σχέση με το σύστημα ελέγχου συναγερμών των προδιαγραφών στους κώδικες πυρκαγιάς.

3.3 Πυρίμαχα ρευστά για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφονται τα πυρίμαχα ρευστά για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές, σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν στο 81^ο ετήσιο συνέδριο του Εθνικού Συλλόγου Πυροπροστασίας (National Fire Protection Association), στις 18 Μαΐου 1977, από τον Henry A. Pearce, της Westinghouse Electric Corporation [8].

Στην αρχή γίνεται λόγος για τα ρευστά που χρησιμοποιούνταν ως μονωτικά υλικά στους μετασχηματιστές, τα λεγόμενα askarels, τα οποία είναι πυρίμαχα. Κατόπιν, γίνεται λόγος για τις παραδοσιακές εναλλακτικές επιλογές έναντι των askarels, αφού αυτά ωθούνταν προς πλήρη αντικατάσταση, λόγω περιβαλλοντικών και άλλων επιπτώσεων. Τέλος, γίνεται λόγος για τις τότε νέες εμπορικές εναλλακτικές επιλογές έναντι των askarels, οι οποίες ανοίγονταν (πάντα για την χρονική περίοδο στην οποία έγινε η δημοσίευση) για την αντικατάστασή τους.

3.3.1 Askarels

Μια έρευνα βρισκόταν εν εξελίξει το 1977 για την τελική αντικατάσταση των πολυχλωριωμένων διφαινυλίων, που χρησιμοποιούνταν ως μόνωση στους βιομηχανικούς μετασχηματιστές. Μερικές δυνατότητες είχαν ήδη εμφανιστεί, αλλά άλλες επρόκειτο να εξερευνηθούν.

Για πολλά έτη, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια, αλλιώς γνωστά ως PCBs και αποκαλούμενα γενικά askarels, χρησιμοποιούνταν στους μετασχηματιστές, στους οποίους η μη ευφλεκτότητα ήταν απαιτούμενη ή επιθυμητή. Τα Askarels είχαν κατασκευαστεί στις ΗΠΑ, σχεδόν πριν από 50 έτη από τη δημοσίευση. Στη δημοσίευση αυτή, εξετάστηκε η εφαρμογή των PCBs στους μετασχηματιστές και ιδιαίτερα οι εναλλακτικές λύσεις στην εφαρμογή των PCBs, από τότε που η κυβέρνηση των ΗΠΑ είχε εξουσιοδοτήσει νομικά την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – EPA) να συντάξει κανονισμούς, οι οποίοι οδήγησαν στη διακοπή της χρήσης των ρευστών PCB σε νέο ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Θεωρήθηκε σημαντικό να εξεταστεί η φύση της εφαρμογής των μονωμένων με PCB μετασχηματιστών. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι αυτοί οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ασφάλεια από την πυρκαγιά, σε περίπτωση βλάβης μετασχηματιστών, που οδηγεί στην αποβολή του διηλεκτρικού υγρού και προϊόντων αποσύνθεσης από το μετασχηματιστή. Πράγματι, η πρόθεση πίσω από την ανάπτυξη και εφαρμογή των μονωμένων με PCB μετασχηματιστών, ήταν να παρέχουν ασφάλεια για τους ανθρώπους γύρω τους. Δεδομένου ότι αυτοί οι άνθρωποι βρίσκονταν γενικά σε δομές όπως κτίρια διαμερισμάτων, νοσοκομεία και εργοστάσια, αυτοί ήταν οι τύποι περιβάλλοντος όπου χρησιμοποιήθηκαν οι μονωμένοι με PCB μετασχηματιστές.

Τα ρευστά PCB πρόσφεραν την άριστη αντίσταση στην πυρκαγιά και δεν είχαν ουσιαστικά κανένα σημείο ανάφλεξης. Τα ηλεκτρικά προϊόντα αποσύνθεσης, συμπεριλαμβανομένων των σχήματος τόξου αερίων, ήταν άφλεκτα, ενώ ήταν κυρίως υδροχλώριο. Είχαν επίσης καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και εξυπηρετούσαν οικονομικά την εφαρμογή. Λόγω της ασφάλειας που παρείχαν σε ανθρώπους και κτίρια, οι μετασχηματιστές PCB χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε όλη τη βιομηχανία. Αυτοί οι μετασχηματιστές αγοράστηκαν κυρίως από δύο τύπους πελατών: τον βιομηχανικό ή εμπορικό χρήστη και τη βιομηχανία ηλεκτρικής ωφέλειας.

3.3.2 Παραδοσιακές εναλλακτικές

Κατά τη διάρκεια των πολλών ετών στα οποία οι μετασχηματιστές askarel εγκαθίσταντο, υπήρξαν διαθέσιμες εμπορικές εναλλακτικές λύσεις, που θα μπορούσαν να έχουν εξεταστεί από κάθε εργολάβο, ηλεκτρική επιχείρηση δημόσιας ωφέλειας και μηχανικό. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο συμβατικός μονωμένος με λάδι υδρογονάνθρακα μετασχηματιστής, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα εύφλεκτο έλαιο, δεδομένου ότι έχουν ληφθεί προφυλάξεις ασφάλειας. Η ικανότητα ανάφλεξης του ελαίου, μαζί με αυτήν των ηλεκτρικά αναπτυγμένων προϊόντων αποσύνθεσης, μπορεί να περιοριστούν σε έναν

κατάλληλα σχεδιασμένο υπόγειο θάλαμο. Η κατασκευή υπόγειων θαλάμων που ενσωματώνει έναν συμβατικό μονωμένο με λάδι υδρογονάνθρακα μετασχηματιστή, είναι ακριβή, και ενώ είναι διαθέσιμος αυτός ο τύπος μετασχηματιστή τις περισσότερες φορές έχει αποφευχθεί λόγω του υψηλού κόστους της περιφραξής. Από μια σκοπιά ηλεκτρικής απόδοσης, εντούτοις, ο συμβατικός μετασχηματιστής ελαίου παρέχει όλα τα πλεονεκτήματα απόδοσης ενός μονωμένου μετασχηματιστή PCB και, επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή ως αντικατάσταση, με αυξημένο κόστος.

Μια δεύτερη παραδοσιακή εναλλακτική για το μονωμένο μετασχηματιστή PCB, είναι ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου. Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου υπάρχουν σε διάφορα σχέδια.

Υπάρχει ο εξαεριζόμενος μετασχηματιστής ξηρού τύπου, που ψύχεται με την κυκλοφορία του αέρα και, όπως με άλλους μετασχηματιστές ξηρού τύπου, έχει το πλεονέκτημα ότι περιέχει μόνο ένα πολύ περιορισμένο ποσό εύφλεκτου υλικού. Έχει το μειονέκτημα μιας συντομότερης θερμικής χρονικής σταθεράς. Ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου θα αυξήσει τη θερμοκρασία του πολύ γρηγορότερα από έναν μετασχηματιστή υγρού τύπου, όταν βρίσκεται υπό συνθήκες υπερφόρτισης, επειδή η υγρή καταβόθρα θερμότητας δεν είναι διαθέσιμη. Ο εξαεριζόμενος μετασχηματιστής ξηρού τύπου έχει επίσης το μειονέκτημα, ότι επιτρέπει να μπουν στον μετασχηματιστή αερομεταφερόμενοι μολυσματικοί παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να είναι επιβλαβείς στην ηλεκτρική μόνωση.

Ο δεύτερος τύπος μετασχηματιστή ξηρού τύπου που είναι διαθέσιμος είναι ο εντελώς εσωκλειόμενος μη εξαεριζόμενος μετασχηματιστής. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή σφραγίζεται σε ένα περίβλημα χάλυβα και, δεδομένου ότι είναι μη εξαεριζόμενος, αποφεύγεται η είσοδος όλων των τύπων μολυσματικών παραγόντων. Μολυσματικοί παράγοντες, όπως η υγρασία, η οποία υπό τις χειρότερες συνθήκες θα ήταν επιβλαβείς για τη μόνωση, αποκλείονται. Ως εκ τούτου, αυτός ο τύπος μετασχηματιστή αποδεικνύεται πιο αξιόπιστος από άλλους όταν εκτίθενται σε καταστροφικά περιβάλλοντα. Αυτός ο εντελώς εσωκλειόμενος μη εξαεριζόμενος μετασχηματιστής είναι κάπως ακριβότερος από τον εξαεριζόμενο μετασχηματιστή ξηρού τύπου.

Ένας τρίτος μετασχηματιστής είναι ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου με αέριο. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή είναι μη εκρηκτικός και, λόγω του σχεδίου και της κατασκευής του, ήταν ο ασφαλέστερος μετασχηματιστής που κατασκευαζόταν τότε (1977). Αυτός ο μετασχηματιστής σφραγίζεται σε μια δεξαμενή και συνήθως χρησιμοποιεί ένα φθοριωμένο μονωτικό αέριο, που παρέχει πλεονεκτήματα σχεδιασμού. Το αέριο έχει το πλεονέκτημα ότι βελτιώνει τα χαρακτηριστικά μόνωσης του συνολικού μονωτικού συστήματος, καθώς επίσης βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας. Πάλι, ωστόσο, το κόστος του μετασχηματιστή αυτού είναι μεγαλύτερο. Ενώ οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου μπορεί να έχουν χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικές λύσεις των μετασχηματιστών askarel, είναι γενικά αδύναμοι για μονάδες ίδιου μεγέθους και βάρους, ώστε να παρέχουν ισοδύναμο αποτέλεσμα.

Ο άλλος τύπος μετασχηματιστή που υπήρχε διαθέσιμος είναι ο μετασχηματιστής υγρής σιλικόνης, για τον οποίο γίνεται λόγος παρακάτω.

Για να καθοριστεί ποιος τύπος μετασχηματιστή μπορεί καλύτερα να παρέχει υπηρεσία συγκρίσιμη με αυτήν των μετασχηματιστών PCB, υπάρχουν διάφοροι

άλλοι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν. Η σχέση όλων αυτών των παραγόντων είναι τόσο σύνθετη, που υπάρχει η ανάγκη για μια λεπτομερή αναθεώρηση, πριν ληφθεί μια απόφαση σχετικά με τον τύπο μονάδας που απαιτείται για μια δεδομένη εγκατάσταση. Εκτός από τα προαναφερθέντα, τα λειτουργούντα χαρακτηριστικά απόδοσης που συνδέονται με (1) επίπεδο θορύβου, (2) απώλειες, (3) μηχανική αντοχή, (4) κόστος, (5) αξιοπιστία, (6) επίπεδο τάσης, και (7) σχετικό κίνδυνο έκρηξης, πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Μια άλλη εναλλακτική λύση που είναι διαθέσιμη, αλλά ίσως έχει παραμεληθεί λόγω της απλότητας της γενικής ιδέας, είναι αυτή της αφαίρεσης του μετασχηματιστή από την εγγύτητα των ανθρώπων και τις κτιριακές εγκαταστάσεις. Αυτό μπορεί να είναι ανεπιθύμητο, επειδή πρέπει να είναι διαθέσιμη κοντινή έκταση για την τοποθέτηση του μετασχηματιστή και απαιτούνται πιο μακριά καλώδια. Έχει το πλεονέκτημα, ωστόσο, ότι αφαιρεί εντελώς τα καύσιμα υλικά από το κτίριο ή την κατασκευή και, επομένως, επιτρέπει τη χρήση εύφλεκτου ελαίου με ασφάλεια. Έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παρέχει τη μέγιστη αποδοτικότητα ψύξης, λόγω της απεριόριστης διαθεσιμότητας εξωτερικού αέρα.

3.3.3 Νέες εμπορικές εναλλακτικές

Με την παύση των μετασχηματιστών PCB, η ηλεκτρική βιομηχανία έχει εργαστεί σκληρά με τους προμηθευτές υλικών, για να βρει εναλλακτικά ρευστά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακίνδυνα ως αντικαταστάτες. Με τους μονωμένους μετασχηματιστές PCB να μην είναι πλέον διαθέσιμοι, η βιομηχανία έχει κοιτάξει προσεκτικά για εναλλακτικές λύσεις. Οι συντελεστές, που έφεραν ένα τέλος στη χρήση των PCBs, λαμβάνονται υπόψη ξανά κατά την έρευνα μιας αντικατάστασης. Αυτές οι συντελεστές είναι: (1) κατάλληλες ηλεκτρικές ιδιότητες, (2) κατάλληλα χαρακτηριστικά ασφάλειας, (3) περιβαλλοντική δεκτικότητα, (4) διαθεσιμότητα, (5) κατάλληλα θερμικά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και (6) οικονομική δυνατότητα υλοποίησης.

Πριν γίνει εκτίμηση των εναλλασσόμενων ρευστών, μια συζήτηση του όρου «askarel» μπορεί να είναι επιθυμητή. Ο όρος «askarel» έχει χρησιμοποιηθεί για να παρέχει μια γενική περιγραφή των άφλεκτων ρευστών, που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές. Δεδομένου ότι η βιομηχανία ανέπτυξε πολύ περισσότερο τη χρήση των ρευστών PCB (με διάφορες μορφές), έγιναν τελικά ο μόνος σημαντικός τύπος υλικού που χρησιμοποιήθηκε υπό το γενικό όρο «askarel», αν και άλλα υλικά χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς. Η έκδοση του Ινστιτούτου Ηλεκτρονικών και Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms (έκδοση του 1972) ορίζει το askarel ως εξής: «Ένα συνθετικό άφλεκτο μονωτικό υγρό που, όταν αποσυντίθεται από ένα ηλεκτρικό τόξο, εκλύει μόνο άφλεκτα αέρια μίγματα». Στον Εθνικό Ηλεκτρικό Κώδικα του 1975 το askarel ορίζεται ως εξής: «Ένας γενικός όρος για μια ομάδα άφλεκτων συνθετικών χλωριωμένων υδρογονανθράκων, που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικά μονωτικά μέσα. Χρησιμοποιούνται Askarels διάφορων συνθετικών τύπων. Υπό συνθήκες τόξων, τα αέρια που παράγονται, ενώ αποτελούνται κυρίως από άφλεκτο υδροχλώριο, μπορεί να περιλαμβάνουν ποικίλες ποσότητες από καύσιμα αέρια, ανάλογα με τον τύπο askarel». Αυτός ο ορισμός θέτει το πεδίο για τα ρευστά

αντικατάστασης που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως askarels. Φαίνεται ότι τα λιγότερο ικανοποιητικά μέρη του ορισμού είναι «άφλεκτα συνθετικά» και «αέρια... κυρίως... άφλεκτα». Μπορεί να είναι απαραίτητο, εφόσον βρεθούν ρευστά αντικατάστασης, να τροποποιηθεί ο όρος «askarel» ή να αναπτυχθεί ένας νέος όρος για να περιγράψει τα ασφαλή ρευστά για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Η πρώτη υγρή εναλλακτική λύση που η βιομηχανία έχει εξετάσει, είναι τα ρευστά σιλικόνης. Αυτά τα ρευστά είναι διαθέσιμα εσωτερικά στις ΗΠΑ και έχουν χρησιμοποιηθεί στις ηλεκτρικές εφαρμογές. Τα ρευστά σιλικόνης δεν είχαν χρησιμοποιηθεί μέχρι τότε ως αντικαταστάτες για τα ρευστά PCB, λόγω (1) της ευρείας αποδοχής των PCBs, (2) του σχετικά υψηλού κόστους των ρευστών σιλικόνης και (3) των χαρακτηριστικών απόδοσής τους. Ωστόσο, καθώς τα PCBs καταργήθηκαν σταδιακά, τα ρευστά σιλικόνης αξιολογήθηκαν λεπτομερώς για τη χρήση ως αντικατάσταση και, κατά συνέπεια, έχουν εξειδικευτεί σε πολλούς νέους μετασχηματιστές. Στην εξέταση της εφαρμογής των ρευστών σιλικόνης, είναι απαραίτητο να αντισταθμιστούν τα χαρακτηριστικά τους, που διαφέρουν από εκείνα των ρευστών PCB. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν: (1) μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διαστολής, (2) υψηλότερο ιξώδες, (3) τάση να απορροφούν και να κρατούν υγρασία, (4) διαφορές στη συμβατότητα με τα υλικά και (5) ιδιότητες έντασης επιφάνειας που μπορούν να οδηγήσουν να διαποτιστεί η πορώδης στερεά μόνωση. Αυτοί οι παράγοντες έχουν όλοι ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό μονωμένων μετασχηματιστών με ρευστή σιλικόνη και, ήδη παρέχονται μετασχηματιστές ρευστής σιλικόνης υψηλής αξιοπιστίας σε εμπορική βάση.

Μια δεύτερη εμπορική εναλλακτική λύση έναντι των ρευστών PCB είναι οι ρευστοί υδρογονάνθρακες, οι οποίοι έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά ανάφλεξης και πυρκαγιάς, σε σχέση με το συμβατικό ηλεκτρικό μονωτικό λάδι. Διάφοροι συνθετικοί ρευστοί υδρογονάνθρακες έχουν γίνει διαθέσιμοι στο εμπόριο. Η φύση αυτών των ρευστών παρουσιάζει παρόμοιο ενδιαφέρον σχεδιασμού που πρέπει να εξεταστεί. Παράγοντες όπως το ιξώδες, οι σχέσεις θερμοκρασίας, η συμβατότητα με άλλα μονωτικά υλικά, η ευκολία εμποτισμού, τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και το κόστος, πρέπει να εξετάζονται και για τους δύο: τους εξευγενισμένους, φυσικούς υδρογονάνθρακες και τους συνθετικούς ρευστούς υδρογονάνθρακες. Ο πίνακας 3.3.3-1 παρουσιάζει σχέσεις μεταξύ των PCBs, της σιλικόνης και των υδρογονανθράκων υψηλού σημείου ανάφλεξης. Μπορεί να φανεί ότι υπάρχουν μείζονες διαφορές απόδοσης σε αυτές τις κατηγορίες ρευστών. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3.3-1, αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ρευστών σιλικόνης και των υδρογονανθράκων, ούτε είναι ισοδύναμοι με τα PCBs στο σημείο ανάφλεξης, ούτε αποβάλλουν τη δυνατότητα παραγωγής εύφλεκτων αερίων υπό μορφής τόξου. Το κόστος των σιλικόνων και τα χαρακτηριστικά των καθαρών υδρογονανθράκων, τείνουν να περιορίσουν την αποδοχή τους ως τελικοί αντικαταστάτες για τα askarels στην κατασκευή των μετασχηματιστών.

Υγρά	Ηλεκτρική δύναμη 60Hz kV	Ηλεκτρική δύναμη Impulse (fullwave) kV	Ιξώδες 100 °F	Ιξώδες 210 °F	Σημείο Ανάφλεξης (°C)	Κόστος
Σιλικόνη	35	300	50	1,04	360	Υψηλό
Συνθετικός Υδρ/κας	39	300	33	0,63	260	Μέτριο
Εξευγενισμένος Υδρ/κας	37	–	150	0,8	321	Μέτριο
Askarel	35	100	2,6	2,6	–	Μέτριο

Πίνακας 3.3.3-1: Σύγκριση εμπορικών εναλλακτικών λύσεων έναντι των askarels

3.3.4 Εξελισσόμενες λύσεις

Διάφοροι παραγωγοί των συνθετικών οργανικών υλικών εργάζονταν, προσπαθώντας να βρουν υγρά που θα ικανοποιήσουν τις ηλεκτρικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές απαιτήσεις αυτής της σημαντικής εφαρμογής. Το 1977, υπήρχαν προσεγγίσεις υπό έρευνα, που περιλάμβαναν τη χρήση των φωσφορικών εστέρων, χλωριωμένων υδρογονανθράκων διάφορων τύπων, καθώς και άλλων αλογονομένων υλικών. Υπήρχε, επίσης, μια προσέγγιση ώστε το νερό να χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο, σε συνδυασμό με τα στερεά διηλεκτρικά υλικά. Ο πίνακας 3.3.4-1 απαριθμεί μερικά από αυτά τα ρευστά που τότε ήταν υπό εξέλιξη, μαζί με τους σημαντικότερους τομείς των ελέγχων που έπρεπε να γίνουν, πριν οποιαδήποτε από τα εξεταζόμενα ρευστά να μπορέσουν επαρκώς να αντικαταστήσουν τα ρευστά PCB, ως το υγρό διηλεκτρικό του μετασχηματιστή. Επιπρόσθετα, διεξαγόταν εξελικτική εργασία με τις σιλικόνες. Η σιλικόνη, σε αυτήν την περίπτωση, είναι διμεθυλική σιλικόνη και οι προμηθευτές σιλικόνης εργάζονταν για να αναπτύξουν ένα υλικό με λιγότερο εύφλεκτα αέρια παραγόμενα από ηλεκτρικό τόξο.

Υγρά	Σημείο Ανάφλεξης	Ευφλ/τα αερίων παραγόμενων από τόξο	Ηλεκτρικά χαρ/κά	Υδρολυτική σταθερότητα	Αποδοχή από το περ/λον	Κόστος
Φωσφορικοί εστέρες	Καλό	Εύφλεκτο	Επαρκή	Ανεπαρκής	Καλή	Μέτριο
Χλωρ/νοι υδρ/κες	Κανένα	Όχι εύφλεκτο	Άριστα	Άριστη	Άγνωστη	Υψηλό
Αλογον/νοι υδρ/κες	300 °C κανένα	Ποικίλει	Καλά	Καλή	Άγνωστη	Μέτριο
Νερό	Κανένα	Όχι εύφλεκτο	Ανεπαρκή	Άριστη	Άριστη	Χαμηλό

Πίνακας 3.3.4-1: Σύγκριση εξελισσόμενων εναλλακτικών λύσεων έναντι των PCBs

Μπορεί να φανεί από τον πίνακα 3.3.4-1, ότι οι σημαντικότεροι τομείς ενδιαφέροντος είναι οι ηλεκτρικές ιδιότητες, η υλική σταθερότητα και οικονομική δυνατότητα υλοποίησης. Φυσικά, το περιβαλλοντικό ζήτημα είναι ένα σημαντικό μέρος της έρευνας για αυτά τα ρευστά.

3.3.5 Συμπεράσματα της δημοσίευσης

Σύμφωνα με τη γνώμη του συντάκτη, η τελική αντικατάσταση για τους μονωμένους μετασχηματιστές PCB επιδιωκόταν ακόμα ενεργά. Διάφορες εναλλακτικές λύσεις, εκτός από τις τότε τρέχουσες που προσφέρονταν, ερευνώνταν και μερικές από αυτές μπορούσαν να προσφερθούν για εμπορική χρήση σε δοκιμές.

3.4 Ανάπτυξη ενός Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου και σχεδιασμός ενός συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, Σ.Α.Τ.Υ.Φ. και δοχείου μονωτικού ελαίου

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται η ανάπτυξη ενός Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου και ο σχεδιασμός ενός συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, Σ.Α.Τ.Υ.Φ. και δοχείου μονωτικού ελαίου, με βάση όσα παρουσιάζονται στη δημοσίευση της SERGI France στο IEEE, Mexico Section, Ιούλιος 1999 [9].

Στην αρχή γίνεται λόγος για το ρόλο των ηλεκτρικών προστασιών και κυρίως για την ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης και το δίσκο διάρρηξης. Κατόπιν, εξηγούνται οι λόγοι αποτυχίας του συστήματος εξάλειψης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες νερού. Στη συνέχεια γίνεται λόγος για την πίεση που αναπτύσσεται λόγω βραχυκυκλωμάτων στο κιβώτιο του μετασχηματιστή και αναλύεται με τη βοήθεια του Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού μοντέλου, ενώ εξηγείται γιατί δεν υπάρχει όφελος από την χρήση ελαίου σιλικόνης σε σχέση με τα συμβατικά έλαια. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στην απόδοση του δίσκου διάρρηξης. Τέλος, γίνεται λόγος για το σύστημα πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, το οποίο αναπτύχθηκε από τη SERGI.

3.4.1 Στοιχεία βάσης δεδομένων

Από τα στοιχεία της βάσης δεδομένων της SERGI, έχει καταδειχτεί η αναποτελεσματικότητα των τρεχόντων μηχανικών δοχείων προστασίας υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος, όπως επίσης και η ανεπάρκεια της μεθόδου εξάλειψης της πυρκαγιάς του μετασχηματιστή με συμβατικούς ψεκαστήρες νερού. Δοκιμές και έρευνες έχουν επίσης επιβεβαιώσει ότι οι υπάρχουσες μηχανικού τύπου προστασίες είναι αναποτελεσματικές.

Τα περιστατικά που καταγράφηκαν από συστήματα απόκτησης μηχανογραφημένων δεδομένων εγκατάστασης, SCADA, μελετήθηκαν πολύ προσεκτικά και έχουν να κάνουν με:

- Ενεργοποίηση Ηλεκτρικής Προστασίας
- Χρόνο ενεργοποίησης διακόπτη μετασχηματιστή
- Ενεργοποίηση ανακουφιστικής βαλβίδας πίεσης

Η γνώση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η αύξηση της πίεσης του κιβωτίου, σε αντιπαράθεση με εγχεόμενη ενέργεια βραχυκυκλώματος. Με όλα αυτά τα αποτελέσματα, σχεδιάστηκε ένα μοντέλο σε υπολογιστή, ώστε να επιτραπεί η προσομοίωση διάφορων ειδών συμβάντων για μετασχηματιστές, με προκαθορισμένη τάση, ισχύ και όγκο.

3.4.2 Αποδοτικότητα μηχανικής προστασίας

Στις μέρες μας, οι μετασχηματιστές προστατεύονται με ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης. Πριν από αυτό, χρησιμοποιούνταν δίσκοι διάρρηξης ώστε να αποφευχθεί η έκρηξη του κιβωτίου.

Με βάση τα στοιχεία από τη βάση δεδομένων της SERGI, μόνο λίγα παραδείγματα ανακουφιστικής βαλβίδας πίεσης κατάφεραν να αποτρέψουν την έκρηξη του μετασχηματιστή κατόπιν βραχυκυκλώματος.

Ωστόσο, βρέθηκε ότι, σε πολλές περιπτώσεις, οι δίσκοι διάρρηξης απομάκρυναν την ενέργεια κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, αποδεικνύοντας ότι μπορούν να διασώσουν το κιβώτιο από την έκρηξη.

Η ανάλυση της βάσης δεδομένων έδειξε επίσης ότι το σχέδιο δίσκου διάρρηξης είχε εγκαταλειφθεί, εξαιτίας των ακόλουθων αιτιών:

- Οι διέξοδοι που προορίζονταν για την απομάκρυνση του φλεγόμενου ελαίου δεν οριοθετήθηκαν ποτέ ώστε να οδηγήσουν σε ένα χώρο αποθήκευσης. Το φλεγόμενο λάδι εκτοξευόταν προς άλλον εξοπλισμό και μετέδιδε την πυρκαγιά στην εγκατάσταση.
- Μόλις ο μηχανισμός απομάκρυνε ενέργεια, αέρας εισερχόταν στο κιβώτιο και προκαλούσε εσωτερική πυρκαγιά.

3.4.3 Αποτυχίες συστήματος εξάλειψης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες νερού

Είναι λίγα τα γνωστά παραδείγματα επιτυχημένης εξάλειψης της πυρκαγιάς μετασχηματιστή με ψεκασθήρες νερού. Συν τοις άλλοις, έχει καταγραφεί ένας μεγάλος αριθμός μεγάλων αποτυχιών αυτής της μεθόδου, διότι:

- Η εξάλειψη της πυρκαγιάς του ελαίου του μετασχηματιστή με νερό, είναι σχεδόν αδύνατη για τυπικές πυρκαγιές μετασχηματιστών. Όταν ένας μετασχηματιστής εκρήγνυται, η σωλήνωση ψεκασθήρων νερού, που είναι τοποθετημένη πάνω από το μετασχηματιστή, εκτοξεύεται μακριά, αφήνοντας ολόκληρη την εγκατάσταση χωρίς προστασία.
- Το νερό είναι βαρύτερο από το λάδι και πέφτει μέσα στα κιβώτια, προκαλώντας την υπερχειλίση του φλεγόμενου ελαίου και την επέκταση της πυρκαγιάς σε παρακείμενο εξοπλισμό.
- Τα ακροφύσια γίνονται ευάλωτα στο να υποστούν φράξιμο και οι εργασίες καθαρισμού απαιτούν την απενεργοποίηση του μετασχηματιστή.
- Το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από 0°C.
- Υψηλό κόστος συντήρησης και απαιτήσεων που οδηγούν σε πολλαπλές αποτυχίες εκκίνησης.

3.4.4 Αποτελέσματα της ανάλυσης της βάσης δεδομένων

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω εμπειρία, μία νέα γενιά πρόληψης της έκρηξης και της πυρκαγιάς μετασχηματιστή έχει σχεδιαστεί, SERGI type 4000.

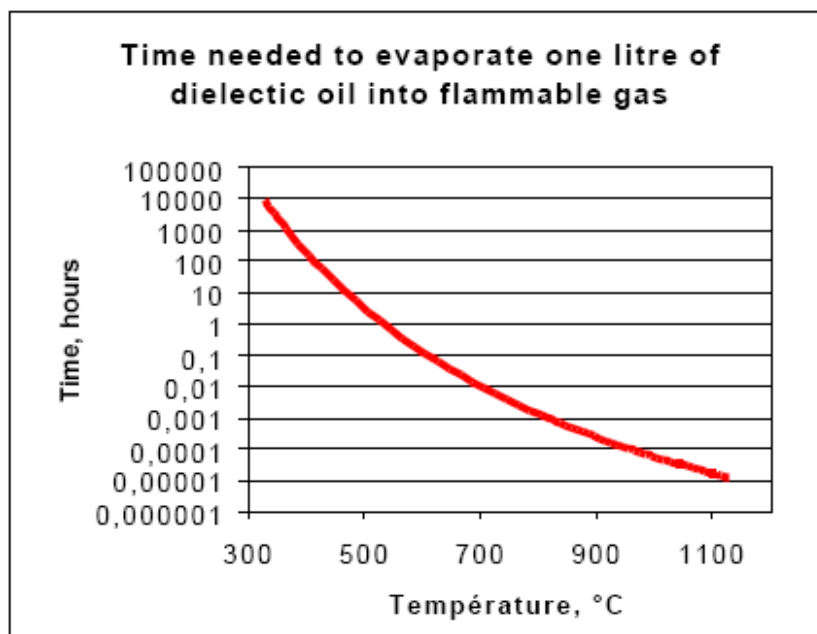
Οι δίσκοι διάρρηξης, επομένως, επανεισάχθηκαν, ώστε να σώσουν τα κιβώτια από έκρηξη. Για να καθοριστεί το μέγεθος των δίσκων διάρρηξης, είναι απαραίτητο να ποσοτικοποιηθεί και, επομένως, να κατανοηθεί η μεταφορά ενέργειας στο διηλεκτρικό λάδι, κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, όπως επίσης και η αύξηση της πίεσης του κιβωτίου. Ένα ερευνητικό πρόγραμμα υλοποιήθηκε από τη SERGI ώστε να ποσοτικοποιηθούν όλα τα φαινόμενα και οι παράμετροι.

3.4.5 Η ανάλυση του φαινομένου βραχυκυκλώματος μέσα σε έναν μετασχηματιστή

Ο μηχανισμός διάσπασης του ελαίου, με επακόλουθες θερμικές επιπτώσεις, έχει αναλυθεί και επισημοποιηθεί, ενώ διάφορες χρήσιμες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί νωρίτερα σε αυτόν τομέα. Το αποτέλεσμα ήταν ένα πλήρες Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικό μοντέλο. Η διπλή ανάλυση της φυσικής εξίσωσης και χημικής κινητικής μηχανικής επετεύχθη χρησιμοποιώντας ισχυρό λογισμικό.

Για να κατανοηθεί το φαινόμενο της δημιουργίας του αερίου υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος, πρέπει να δούμε τη γραφική παράσταση του χρόνου που χρειάζεται για να μετατραπεί το λάδι σε αέριο, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

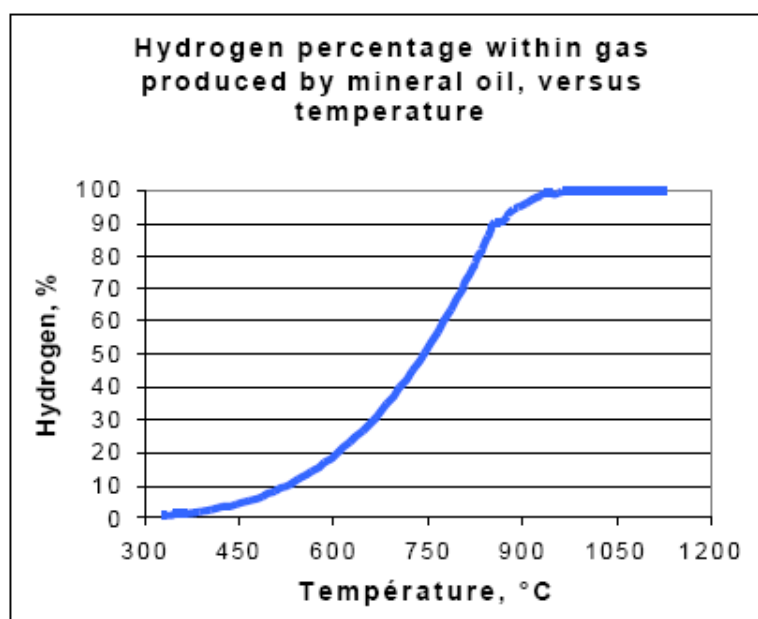
Στο σχήμα 3.4.5-1 φαίνεται ότι κάτι τέτοιο χρειάζεται 10.000 ώρες (1,1 χρόνια) στους 330°C και μόλις 0,00001 ώρες (0,036 δευτ.) στους 1100°C.



Σχήμα 3.4.5-1: Απαιτούμενος χρόνος για την εξάτμιση ενός λίτρου υγρού ελαίου σε αέριο

Αυτό που πρέπει να παρατηρηθεί στο σχήμα 3.4.5-1, είναι ο πολύ υψηλός ρυθμός μετατροπής του ελαίου σε αέριο, όταν είναι στην περιοχή θερμοκρασιών που επηρεάζει το βραχυκύκλωμα.

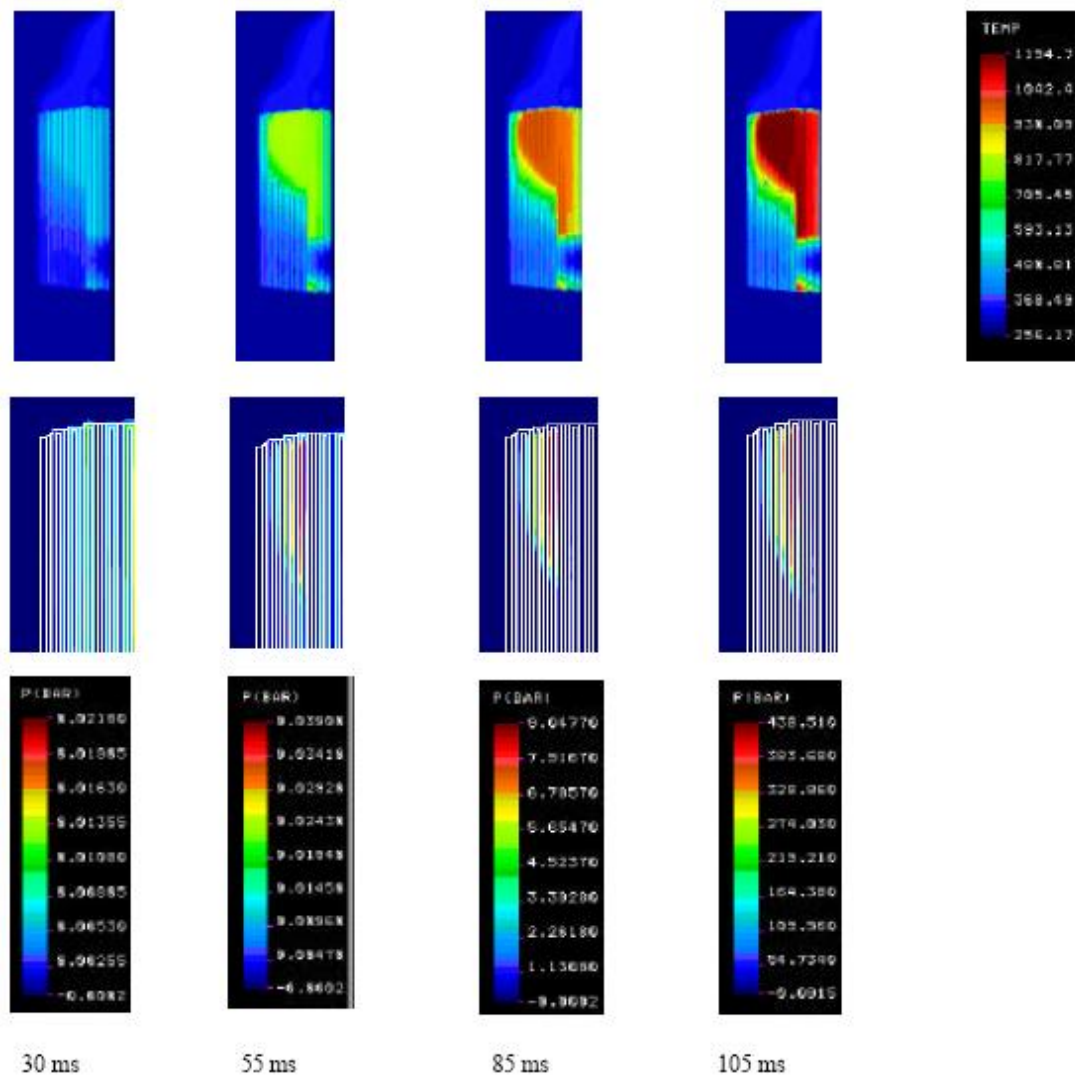
Το σχήμα 3.4.5-2 δείχνει ότι η αναλογία υδρογόνου, μέσα στο αέριο μείγμα που δημιουργείται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, φθάνει στο 100%. Το μείγμα δεν περιέχει καθόλου υδρογόνο στους 300°C, ενώ στους 950°C είναι στο 100%.



Σχήμα 3.4.5-2: Ποσοστό Υδρογόνου μέσα στο αέριο που παράγεται από το υγρό λάδι, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Το σχήμα 3.4.5-3 δείχνει την εξέλιξη της τοπικής θερμοκρασίας και τοπικής πίεσης, στα 30, 55, 85 και 105ms κατόπιν του ηλεκτρικού σφάλματος, για τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Περιοχή έρευνας τοποθετημένη στο αριστερό μέρος ενός μετασχηματιστή 20MVA εξοπλισμένου με ένα ΣΑΤΥΦ.
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης 240kA για 6 φορές, με και χωρίς tripping.
- Διηλεκτρικό ορυκτό έλαιο, σημείου ανάφλεξης 140°C.



Σχήμα 3.4.5-3: Η εξέλιξη της τοπικής θερμοκρασίας και τοπικής πίεσης, στα 30, 55, 85 και 105ms κατόπιν του ηλεκτρικού σφάλματος

Πρέπει να τονιστούν:

- Αισθητή αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας είναι αποτελεσματική μετά τα 55ms, λόγω της αδράνειας δημιουργίας αερίου, που φαίνεται στο σχήμα 3.4.5-1.
- Η τοπική πίεση αυξάνεται περίπου κατά 450bar μεταξύ των 55 και 105ms μετά το βραχυκύκλωμα.

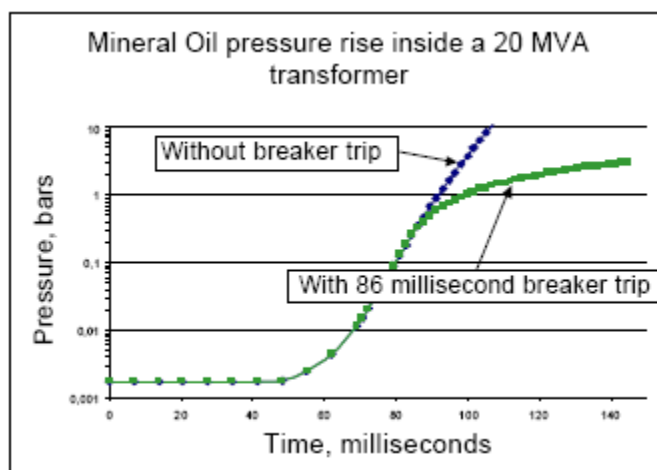
- Όταν ανοίγει ο διακόπτης κυκλώματος, 85ms μετά το βραχυκύκλωμα, οι τοπικές θερμοκρασίες είναι κυρίως πάνω από 660°C. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.5-2, το αέριο μείγμα αποτελείται κυρίως από υδρογόνο, το οποίο είναι πολύ εκρηκτικό.

Τα παραπάνω τονίζουν τη βιαιότητα των εκρήξεων των δοχείων λόγω βραχυκυκλωμάτων και εξηγούν τη δημιουργία της πυρκαγιάς, σε ένα πολύ εκρηκτικό μείγμα.

Η εξέλιξη της πίεσης μέσα στο δοχείο δίνεται από τη μαθηματική προσομοίωση της τοπικής πίεσης, που φαίνεται στο σχήμα 3.4.5-3, για το δεδομένο όγκο του μετασχηματιστή και των συνιστωσών του.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της τοπικής πίεσης για ολόκληρο το δοχείο, για τον ίδιο μετασχηματιστή και για τις ίδιες συνθήκες σφάλματος με αυτές του σχήματος 3.4.5-3, φαίνονται στο σχήμα 3.4.5-4. Η πίεση του δοχείου φαίνεται στις εξής περιπτώσεις:

- Σφάλμα διακόπτη
- Λειτουργία διακόπτη με καθυστέρηση 86ms



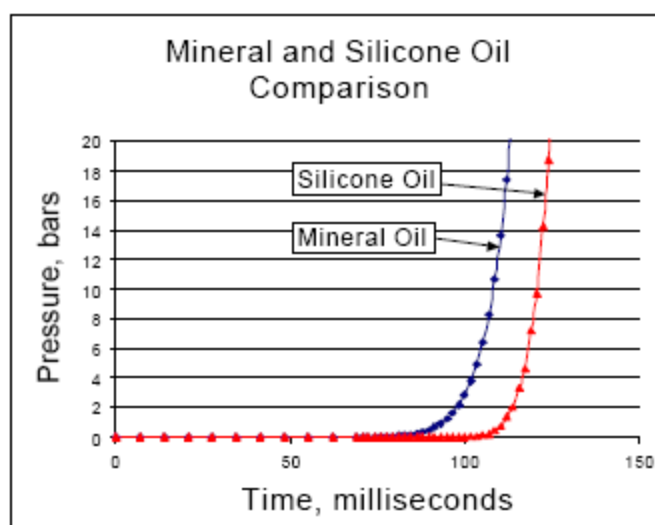
Σχήμα 3.4.5-4: Πίεση ορυκτού ελαίου μέσα σε έναν μετασχηματιστή 20MVA

Στο σχήμα 3.4.5-4, παρατηρούνται τα εξής:

- Η απότομη αύξηση της πίεσης, όταν οι θερμοκρασίες της ζώνης βραχυκυκλώματος φτάνουν στους 600°C, το οποίο συμβαίνει περίπου 50 με 60ms κατόπιν βραχυκυκλώματος. Μετά αυτήν τη χρονοκαθυστέρηση, η πίεση αυξάνεται με ρυθμό 50bar/sec.
- Η πίεση αυξάνεται στα 7 bar, μόλις ενεργοποιηθεί ο διακόπτης κυκλώματος.
- Το πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης του σφάλματος και της έκρηξης του δοχείου του μετασχηματιστή, που είναι περίπου 100ms.

3.4.6 Τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν για λάδι σιλικόνης

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε από τη SERGI για τις προσομοιώσεις, καθιστά δυνατές εφαρμογές, όπως, για παράδειγμα, σύγκριση μεταξύ ορυκτού ελαίου και ελαίου σιλικόνης (σημείο ανάφλεξης 140°C και 240°C αντίστοιχα). Το σχήμα 3.4.6-1 δείχνει αυτή τη σύγκριση για τον ίδιο μετασχηματιστή 20MVA, 6 φορές βραχυκύκλωμα και ρεύμα 240kA. Αποδεικνύει ότι το έλαιο σιλικόνης μόνο καθυστερεί την έκρηξη για 10ms. Καθώς το έλαιο σιλικόνης δημιουργεί τα ίδια αέρια όπως το ορυκτό έλαιο, αυτό δείχνει να μην υπάρχει όφελος, έχοντας υπόψη την τιμή του ελαίου σιλικόνης και την υπερκοστολόγηση του μετασχηματιστή, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους συστήματος ψύξης που απαιτείται.



Σχήμα 3.4.6-1: Σύγκριση ορυκτού ελαίου και ελαίου σιλικόνης

3.4.7 Μέθοδος για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς

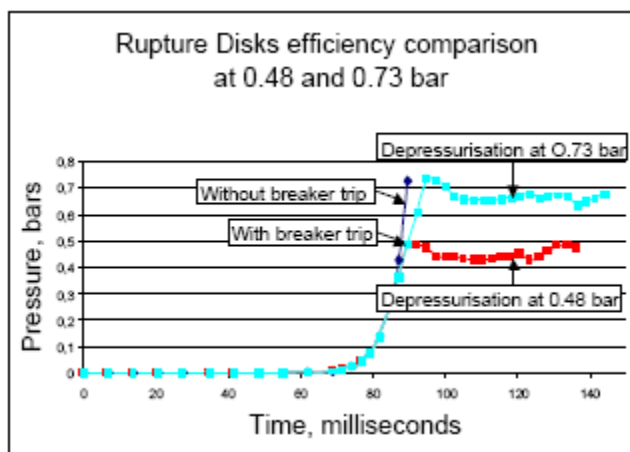
Διεξήχθησαν αναλυτικοί υπολογισμοί της ταχύτητας διαρροής του ελαίου-αερίου διαμέσου σωλήνων αποσυμπίεσης. Επιπλέον, ήταν απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί η διάμετρος του δίσκου διάρρηξης, ώστε να αποσυμπιέζεται γρήγορα το δοχείο.

Αυτοί οι υπολογισμοί επηρεάζουν νέες παραμέτρους ώστε να προσομοιωθεί μία υποχρεωτική ροή διαμέσου του δίσκου διάρρηξης. Το είδος και το μήκος του σωλήνα αποσυμπίεσης επίσης τέθηκε υπόψη, για τον υπολογισμό της ταχύτητας. Η ανάλυση των παραμέτρων έγινε για να κατανοηθεί η επίδραση των εξής:

- Πίεση έκρηξης δίσκου διάρρηξης
- Διάμετρος δίσκου διάρρηξης
- Ποιότητα ελαίου και χαρακτηριστικά
- Δριμύτητα ηλεκτρικού σφάλματος

Το σχήμα 3.4.7-1, ακολούθως, δείχνει την αποδοτικότητα ενός δίσκου διάρρηξης 8 ιντσών, υπό πίεση 0,48 και 0,73 bar. Ο μετασχηματιστής είναι 20MVA,

6 φορές βραχυκύκλωμα, ηλεκτρικό ρεύμα 240kA, με σημείο ανάφλεξης ελαίου 140°C.



Σχήμα 3.4.7-1: Απόδοση δίσκου διάρρηξης για 0,48 και 0,73bar

Από την παραπάνω καμπύλη, φαίνονται τα εξής:

- Η αναταραχή της πίεσης κατόπιν της έκρηξης του δίσκου διάρρηξης, λόγω του μείγματος ελαίου-αερίου.
- Η κλίση της καμπύλης αποσυμπίεσης, η οποία είναι εκ φύσεως ευθεία μετά την έκρηξη του δίσκου διάρρηξης στα 0,73bar, αφού η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι μεγαλύτερη.
- Και στις δύο περιπτώσεις, η πίεση δεν αυξάνεται περισσότερο, μετά την έκρηξη του δίσκου διάρρηξης.

Όλα αυτά τα αποτελέσματα έχουν συνεισφέρει στην ιδέα του συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, SERGI τύπος 4000, που παρουσιάζεται ακολούθως.

3.4.8 Σύστημα πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, SERGI, τύπος 4000

Οι δίσκοι διάρρηξης είχαν εγκαταλειφθεί για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην παράγραφο 3.4.2. Ως εκ τούτου, το λάδι πρέπει να διοχετεύεται και η επαφή με τον αέρα να είναι απαγορευμένη, πριν την απομάκρυνσή του σε κάποια κοιλότητα. Ένας δίσκος διάρρηξης, με έναν ολοκληρωμένο ανιχνευτή έκρηξης, σχεδιάστηκε από τη SERGI, ώστε να αποφευχθεί η επαφή ελαίου-αέρα, ώστε να μπορεί να διοχετευτεί άζωτο στο μετασχηματιστή κατά τη διάρρηξη του δίσκου.

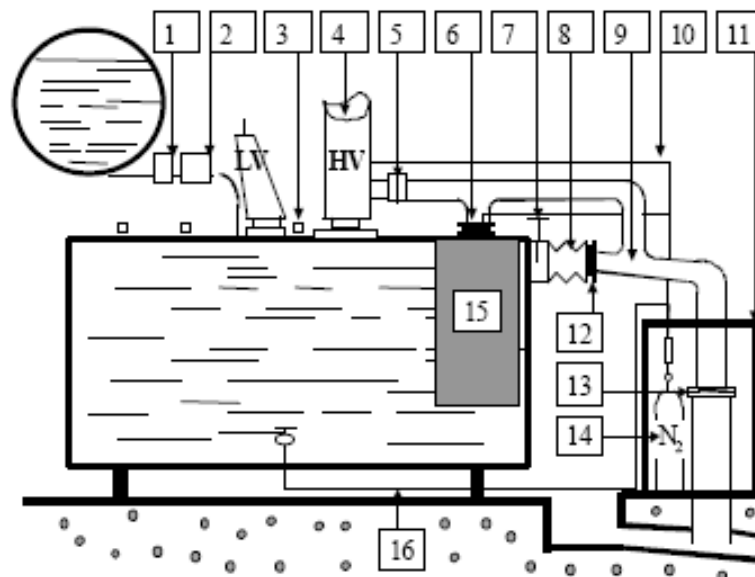
Μία βαλβίδα μόνωσης αέρα, επίσης, τοποθετήθηκε στο τέλος του σωλήνα αποσυμπίεσης, απαγορεύοντας την είσοδο του αέρα. Ο ρόλος της εισροής αζώτου είναι:

- Να σταματήσει άμεσα την παραγωγή εκρηκτικού αερίου.
- Να απομακρύνει το υδρογόνο που αποθηκεύεται στα άνω μέρη του δοχείου.

- Να αντικαταστήσει το εκρηκτικό αέριο με άζωτο στο εσωτερικό του δοχείου.
- Να αποτρέψει την επαφή ελαίου-αέρα, ασκώντας μια ελαφριά πίεση στο μετασχηματιστή με αέριο άζωτο.
- Να μειώσει την καταστροφή που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας στα μεταλλικά μέρη.
- Να ψύξει τελείως το μετασχηματιστή, εισάγοντας άζωτο για 45 λεπτά.

Επιπροσθέτως, για να ανταπεξέλθει με σφάλματα αισθητήρων, η συμβατική μέθοδος εξάλειψης πυρκαγιάς με χρήση αζώτου (που αποκαλείται Drain & Stir), παρέχει υποστήριξη στο σύστημα πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή. Η αρχή αυτή έγκειται στη χρήση αζώτου στη βάση του μετασχηματιστή για την εξάλειψη της πυρκαγιάς.

Οι κύριες συνιστώσες και γενική εγκατάσταση του συστήματος SERGI, τύπος 4000AB, δίνονται παρακάτω, στο σχήμα 3.4.8-1.



1. Shutter
2. Buchholz
3. Fire Detectors
4. Bushings
5. Bushings Rupture Disk
6. On Load Tap Changers Rupture Disk
7. Maintenance Valve
8. Absorber
9. Depressurisation Pipe
10. On Load Tap Changers and Bushings Nitrogen Injection Pipe
11. Cabinet
12. Transformer Vessel Rupture Disk
13. Air Insolation Valve
14. Nitrogen Cylinder equipped with Pyrotechnic Valve
15. On Load Tap Changers
16. Transformer Vessel Nitrogen Injection Pipe

Σχήμα 3.4.8-1: Σύστημα πρόληψης και εξάλειψης πυρκαγιάς SERGI, type 4000AB

3.4.9 Συμπεράσματα της δημοσίευσης

Η εμπειρία της SERGI, μαζί με τις έρευνες που έχουν γίνει για πολλά χρόνια, έχει οδηγήσει στη δημιουργία ενός γενικού Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού μοντέλου και σε μια νέα γενιά συστημάτων πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, με σκοπό να:

- Αντισταθμίσει τους τεχνολογικούς περιορισμούς των διακοπών κυκλώματος, οι οποίοι ανοίγουν όταν η διαδικασία της έκρηξης έχει ήδη ξεκινήσει.
- Προστατεύει τους μετασχηματιστές από την έκρηξη, καθώς οι υπάρχουσες μηχανικές προστασίες δεν είναι σχεδιασμένες για αυτό.
- Εξαλείφει την πυρκαγιά, στην περίπτωση σφάλματος αισθητήρων.

Το νέο αυτό σύστημα έχει σχεδιαστεί για την προστασία μετασχηματιστών από 0,5MVA, οι οποίοι συχνά τοποθετούνται στο εσωτερικό κτιρίων, σε εμπορικά κέντρα, σε νοσοκομεία, κλπ και, ως εκ τούτου, είναι επικίνδυνοι για την ασφάλεια των πολιτών.

Η εγκατάσταση ενός συστήματος SERGI τύπος 4000 καθιστά την εγκατάσταση ασφαλέστερη. Προστατεύει όχι μόνο την ανθρώπινη ζωή, αλλά και από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος καταστροφής. Προστατεύει από:

- Αντικατάσταση του μετασχηματιστή, καθώς το σύστημα επιδιορθώνεται γρήγορα.
- Επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του περιβάλλοντος εξοπλισμού και κτιρίων.
- Απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μόλυνση περιβάλλοντος.
- Συντήρηση, καθώς το σύστημα χρειάζεται μόνο έναν ετήσιο έλεγχο εξακρίβωσης καλής λειτουργίας.

3.5 Σύστημα πρόληψης και εξάλειψης πυρκαγιάς για Μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30MVA, 110kV/27kV στο προασιακό τμήμα του Mumbai

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται η μετατροπή του συστήματος ηλεκτροκίνησης 1500 V DC του προασιακού τμήματος του Mumbai σε ένα σύστημα 25 kV AC, για να τροφοδοτηθούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι υποσταθμοί ηλεκτροκίνησης είναι εφοδιασμένοι με μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30 MVA 110 kV/27kV, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο) και ένα σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου [10].

Η έκρηξη ενός μετασχηματιστή και η πυρκαγιά αποτελούν πάντα μια σημαντική ανησυχία παγκοσμίως για τη διοίκηση, δεδομένου ότι, ενώ οι περισσότερες από τις εγκαταστάσεις εξοπλίζονται με συστήματα πυροπροστασίας, εν τούτοις αποτυγχάνουν να εξαφανίσουν την πυρκαγιά. Το σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου που χρησιμοποιείται στο μετασχηματιστή ηλεκτροκίνησης, αποτρέπει τη ρήξη της δεξαμενής του μετασχηματιστή και την πυρκαγιά που οφείλεται σε σφάλματα εσωτερικά και εξαφανίζει την εξωτερική πυρκαγιά. Εκτός από την αυτόματη λειτουργία, το σύστημα επίσης λειτουργεί με απομακρυσμένο ηλεκτρικό έλεγχο και με χειροκίνητο τοπικό έλεγχο. Με την παρουσίαση αυτού του συστήματος πρόληψης και κατάσβεσης της πυρκαγιάς, αναμένεται ότι ο μετασχηματιστής ηλεκτροκίνησης και ο περιβάλλοντας εξοπλισμός θα προστατευθούν από έκρηξη και πυρκαγιά του μετασχηματιστή, προσδίδοντας αξιοπιστία στην κατασκευή του συστήματος ηλεκτροκίνησης, το οποίο είναι ύψιστης σημασίας στα προασιακά τμήματα του Mumbai.

Στην αρχή γίνεται λόγος για τα μειονεκτήματα της έκρηξης του μετασχηματιστή και της πυρκαγιάς στον υποσταθμό, ώστε να δειχθεί η αναγκαιότητα ύπαρξης πυροπροστασίας. Κατόπιν, εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους οι μετασχηματιστές εκρήγνυνται, ενώ ακόμη δίνονται πληροφορίες για τα όρια της ηλεκτρικής και μηχανικής προστασίας των μετασχηματιστών. Στη συνέχεια γίνεται λόγος για το σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου, το οποίο αναλύεται, ενώ γίνεται αναφορά για τον τρόπο ελέγχου του και τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με το σύστημα ψεκασμού CO₂ και το σύστημα ψεκασμού νερού.

3.5.1 Μειονεκτήματα έκρηξης μετασχηματιστή και πυρκαγιάς υποσταθμού

Οι μετασχηματιστές θεωρούνται ως ο πιο κρίσιμος εξοπλισμός μέσα σε μια εγκατάσταση, λόγω της μεγάλης ποσότητας των μονωτικών λαδιών που βρίσκονται σε επαφή με στοιχεία υψηλής τάσης. Η έκρηξη ενός μετασχηματιστή και η πυρκαγιά αποτελούν πάντα μια σημαντική ανησυχία παγκοσμίως για τη διοίκηση, δεδομένου ότι, ενώ οι περισσότερες από τις εγκαταστάσεις εξοπλίζονται με συστήματα πυροπροστασίας, εν τούτοις αποτυγχάνουν να εξαφανίσουν την πυρκαγιά. Η έκρηξη ενός μετασχηματιστή και η πυρκαγιά σε έναν υποσταθμό ηλεκτροκίνησης καταλήγει σε:

- πλήρη διακοπή των υπηρεσιών του σιδηροδρόμου για μία μακρά χρονική περίοδο
- πολύ υψηλές οικονομικές απώλειες οφειλόμενες στην καταστροφή του μετασχηματιστή, καθώς και άλλου περιβάλλοντος εξοπλισμού και την αντικατάσταση αυτών
- μόλυνση του περιβάλλοντος
- αρνητική δημοσιότητα στον γραπτό τύπο, τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης και το κοινό

Επομένως, είναι απαραίτητο να υπάρχει πρόνοια για ένα σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης της πυρκαγιάς σε έναν μετασχηματιστή ηλεκτροκίνησης, ιδιαίτερα σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή όπως το Mumbai. Ως εκ τούτου, στους μετασχηματιστές των υποσταθμών ηλεκτροκίνησης στην περιοχή του Mumbai, αποφασίστηκε η χρήση συστήματος πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες αζώτου, συμμορφωμένη ως προς τις τεχνικές προδιαγραφές του RDSO (Research Designs and Standards Organisation – Υπουργείο Σιδηροδρόμων, Κυβέρνηση της Ινδίας) TI/SCP/PSI/30/TRN1050 για 30MVA, 110/27kV Μονοφασικό Μετασχηματιστή ισχύος Ηλεκτροκίνησης.

3.5.2 Λόγοι έκρηξης μετασχηματιστών

Οι ηλεκτρικοί μετασχηματιστές παρουσιάζουν απώλειες τόσο στα ελίγματα όσο και στον πυρήνα, λόγο για τον οποίο η παραγόμενη θερμότητα είναι ανάγκη να εξανεμιστεί. Τα έλαια που χρησιμοποιούνται είναι διηλεκτρικά και μπορούν να αναφλεγούν πάνω από μία θερμοκρασία της τάξης των 140°C. Πυρκαγιές σε μετασχηματιστές ισχύος μονωμένους με διηλεκτρικό λάδι γενικά παρουσιάζονται, λόγω ενός εσωτερικού ηλεκτρικού σφάλματος μόνωσης, προκαλώντας μία – συχνά πολύ βίαιη – ταχεία ανάφλεξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία εκτεταμένη ρήξη του κιβωτίου του μετασχηματιστή και ανάφλεξη του λαδιού, το οποίο προκαλεί την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε άλλον εξοπλισμό της εγκατάστασης, που μπορεί επίσης να περιέχει μεγάλες ποσότητες καύσιμης ύλης και προϊόντων.

3.5.3 Όρια Ηλεκτρικής και Μηχανικής Προστασίας Μετασχηματιστών

Ακολούθως αναλύονται τα όρια της ηλεκτρικής και μηχανικής προστασίας των μετασχηματιστών:

Ανεπάρκεια Ανακουφιστικής Διάταξης Πίεσης: οι απότομες αλλαγές πίεσης που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων χαμηλής σύνθετης αντίστασης είναι πολύ ταχείες για μηχανολογικές διατάξεις. Όλοι οι μετασχηματιστές που εκρήγνυνται, συνήθως, είναι προστατευμένοι με Ανακουφιστική Διάταξη Πίεσης.

Αναποτελεσματικότητα Συσκευής Buchholz και Ρελέ Ταχείας Πίεσης: οι ηλεκτρικού τύπου προστασίες του μετασχηματιστή δεν είναι σχεδιασμένες να αντιδρούν σε απότομες αλλαγές της πίεσης. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις έκρηξης μετασχηματιστών, η συσκευή Buchholz απέτυχε να ανιχνεύσει κάποια κίνηση αερίου και ελαίου ή διακύμανση πίεσης.

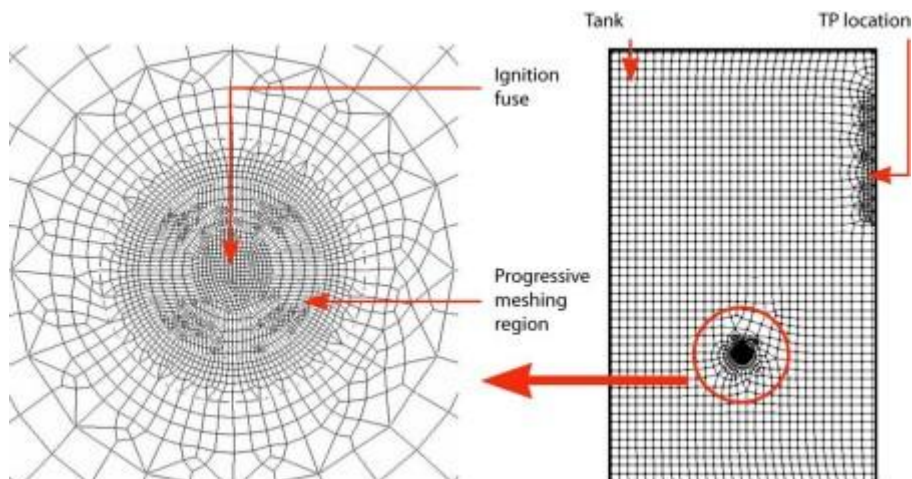
Χρόνος ανοίγματος ηλεκτρικών διακοπών: η καλύτερη τεχνολογία για διακόπτες είναι στα 50ms χρόνο ανοίγματος, αρκετά αργά για να εμποδιστεί η έκρηξη, η οποία συμβαίνει 10 έως 50ms μετά το σφάλμα χαμηλής σύνθετης αντίστασης. Επιπρόσθετα, η πίεση του κιβωτίου εξακολουθεί να αυξάνεται μετά το άνοιγμα του διακόπτη.

3.5.4 Γεγονότα στην έκρηξη και την πυρκαγιά σε μετασχηματιστές

Εκτεταμένα ερευνητικά προγράμματα πάνω στο φαινόμενο μεταφοράς ενέργειας το οποίο συμβαίνει σε έναν μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, έχουν γίνει από μεγάλες βιομηχανίες κατασκευής μετασχηματιστών και σχετικού εξοπλισμού προστασίας. Ο μηχανισμός της διάσπασης του λαδιού υπό θερμικές επιδράσεις έχει αναλυθεί και κατέληξε στην ανάπτυξη του Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου (Magneto-Thermo-Hydrodynamic Model MTH).

Κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας, ανακαλύφθηκε ότι τα ηλεκτρικά τόξα μέσα στο λάδι του μετασχηματιστή μπορούν να παράγουν απότομες αλλαγές πίεσης από 300 έως 930bar/sec (4300 έως 13500psi/sec).

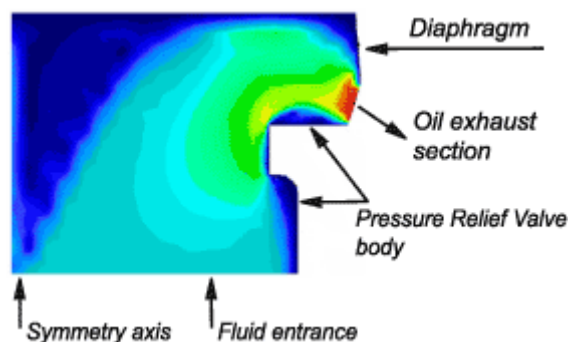
Το σχήμα 3.5.4-1, παρακάτω, δείχνει την MTH τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει ηλεκτρικά τόξα.



Σχήμα 3.5.4-1: Προσομοίωση πλέγματος ηλεκτρικού τόξου

Ανακουφιστικές Διατάξεις Πίεσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία των κιβωτίων των μετασχηματιστών. Ωστόσο, όλοι οι μετασχηματιστές που εκρήγνυνται, είναι εξοπλισμένοι με αυτή τη συσκευή. Η ανικανότητα της ανακουφιστικής διάταξης πίεσης να απελευθερώσουν την πίεση σε αυτές τις περιπτώσεις, οδήγησε τις κατασκευάστριες εταιρείες να διεξάγουν τις δυναμικές μηχανολογικές μελέτες τους. Βέβαια, τέτοιοι υπολογισμοί δεν θα μπορούσαν να έχουν διεξαχθεί, μέχρι που ανακαλύφθηκαν οι απότομες αλλαγές στην πίεση κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Οι ανακουφιστικές διατάξεις πίεσης περιορίζονται από:

- Την αδράνεια του ελάσματος η οποία καθυστερεί το χρόνο αντίδρασης και ανοίγματος
- Τη σχήματος-U απομάκρυνση των αερίων, που προκαλεί απώλειες ενέργειας και μειώνει την ταχύτητα εκκένωσης της πίεσης
- Τη γεωμετρία, διότι όταν είναι ανοικτή κατά το ήμισυ, η επιφάνεια εκκένωσης δεν υπερβαίνει το 15% της μέγιστης επιφάνειας εκκένωσης

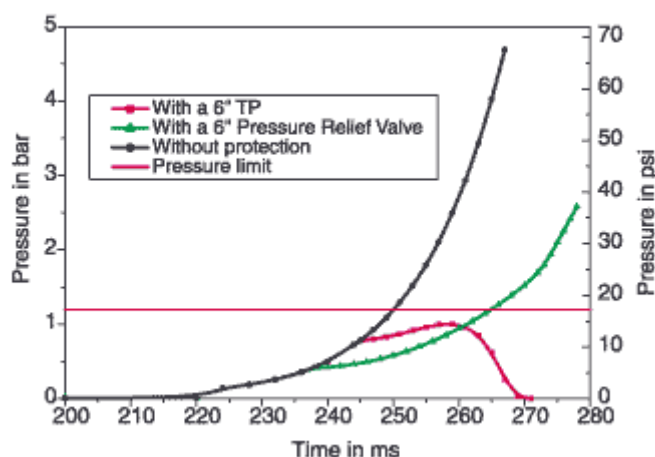


Σχήμα 3.5.4-2: Ανακουφιστική Διάταξη Πίεσης

3.5.5 Σύστημα Πυροπροστασίας – Ανακουφιστική Διάταξη Πίεσης

Η συμπεριφορά του συστήματος πυροπροστασίας και της ανακουφιστικής διάταξης πίεσης έχουν προσομοιωθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες βραχυκυκλώματος, έτσι ώστε να συγκριθούν οι επιδόσεις τους. Σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης:

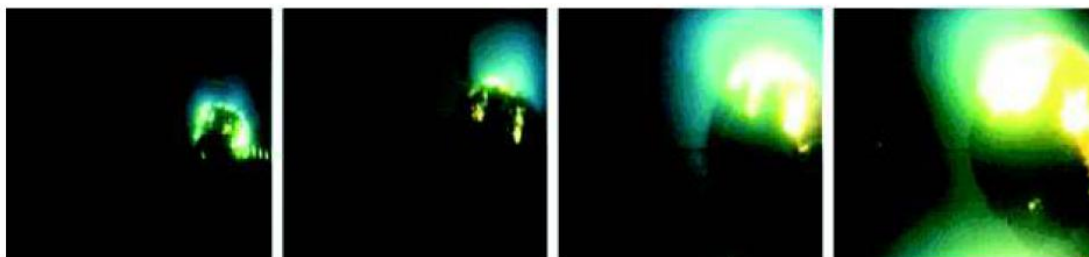
- Το σύστημα πυροπροστασίας υπερέιχε της ανακουφιστικής διάταξης πίεσης και απέτρεψε την έκρηξη του κιβωτίου του μετασχηματιστή
- Η ανακουφιστική διάταξη πίεσης ουδέποτε απέφυγε την έκρηξη του κιβωτίου του μετασχηματιστή



Σχήμα 3.5.5-1: Σύστημα πυροπροστασίας - ανακουφιστική διάταξη πίεσης

3.5.6 Αέρια δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της ρήξης της μόνωσης πριν το ηλεκτρικό τόξο μέσα στο κιβώτιο

Το εργαστήριο υψηλής τάσης του EDF έχει πραγματοποιήσει 28 τεστ σε έναν μετασχηματιστή 160kVA. Ηλεκτρικά τόξα δημιουργήθηκαν με σφάλματα ρεύματος από 2,5 έως 7,5kA, η ενέργεια τόξου ανέρχεται στα 300kJ και ο ρυθμός αύξησης της πίεσης ποικίλει από 200 έως 1200bar/sec (2900 έως 17400psi/sec). Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών, παρατηρήθηκε η ταχεία διαστολή αερίου παραγόμενη από την διάσπαση του ελαίου, πριν τη δημιουργία τόξου. Επίσης, διάφορα όργανα τοποθετημένα γύρω από το κιβώτιο μέτρησαν τα κύματα πίεσης που ακολούθησαν τη δημιουργία των αερίων.



Σχήμα 3.5.6-1: Αέρια παραγόμενα κατά τη διάρκεια της ρήξης της μόνωσης πριν τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μέσα στο κιβώτιο

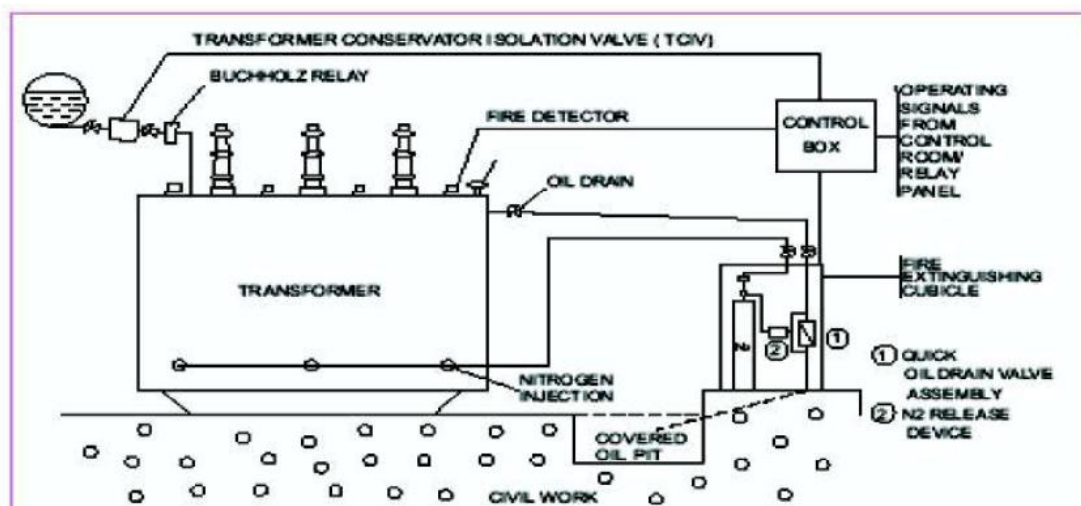
3.5.7 Σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου

Η ηλεκτρική απομόνωση του μετασχηματιστή είναι ένα απαραίτητο προαπαιτούμενο για τους ψεκασθήρες αζώτου. Το σύστημα πυροπροστασίας ενεργοποιείται κάτω από συνθήκες συνύπαρξης διαφορικού ηλεκτρονόμου προστασίας μετασχηματιστή και ανακουφιστικής διάταξης πίεσης. Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου, που χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30MVA 110kV/27kV στην περιοχή του Mumbai περιγράφεται παρακάτω.

Το σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκασθήρες αζώτου:

- αποτρέπει την έκρηξη του κιβωτίου και την πυρκαγιά κατά τη διάρκεια εσωτερικών σφαλμάτων που έχουν ως αποτέλεσμα το τόξο, μετά τη δημιουργία του οποίου θα λάβει χώρα σε λίγα δευτερόλεπτα η έκρηξη του κιβωτίου
- εξαφανίζει την πυρκαγιά εξωτερικών ελαίων στο άνω μέρος του μετασχηματιστή, εξαιτίας έκρηξης του κιβωτίου ή/και εξωτερικών σφαλμάτων όπως πυρκαγιές μονωτήρων, εξαιτίας πυρκαγιών των ΣΑΤΥΦ και πυρκαγιών από περιβάλλοντα εξοπλισμό
- ψύχει τα έλαια του μετασχηματιστή με έναν ψεκασμό αζώτου για κατάλληλη χρονική περίοδο ώστε να αποφευχθεί η επανάφλεξη

Το σύστημα δουλεύει υπό την αρχή της Αποστράγγισης και Ανάδευσης (Drain and Stir) και με την ενεργοποίησή του, αποσύρει μία προκαθορισμένη ποσότητα ελαίου από το υψηλότερο σημείο του κιβωτίου διαμέσου εξωτερικής βαλβίδας, ώστε να μειώσει την πίεση του κιβωτίου και εισάγει αέριο άζωτο υψηλής πίεσης από το χαμηλότερο σημείο του κιβωτίου διαμέσου εσωτερικής βαλβίδας, για να δημιουργήσει ανάδευση και να μειώσει την επιφανειακή θερμοκρασία του ελαίου κάτω από το σημείο ανάφλεξης και να εξαλείψει την πυρκαγιά. Το κιβώτιο προστασίας ελαίου είναι μονωμένο κατά τη διάρκεια της έκρηξης του κιβωτίου και της πυρκαγιάς των ελαίων, ώστε να αποτραπεί η επιδείνωση της πυρκαγιάς. Η μόνωση του μετασχηματιστή είναι μία απαραίτητη προϋπόθεση για την ενεργοποίηση του συστήματος. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί χειροκίνητα σε συνθήκες σφάλματος της πηγής ισχύος.



Σχήμα 3.5.7-1: Σύστημα Πυροπροστασίας Μετασχηματιστή

3.5.8 Λειτουργικός Έλεγχος

Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με αυτόματο έλεγχο για πρόληψη και εξάλειψη πυρκαγιάς, επιπρόσθετα με απομακρυσμένο ηλεκτρικό διακόπτη ελέγχου μέσα σε κουτί ελέγχου και τοπικού χειροκίνητου ελέγχου μέσα σε θάλαμο εξάλειψης πυρκαγιάς. Η μόνωση του μετασχηματιστή από τον κύριο ηλεκτρονόμο απεμπλοκής, ή από διακόπτη κυκλώματος, είναι μία απαραίτητη απαίτηση για την ενεργοποίηση του συστήματος σε κατάσταση αυτόματου ή απομακρυσμένου ηλεκτρικού ελέγχου.

3.5.8.1 Αυτόματος έλεγχος

Παρακάτω αναλύονται οι τρόποι λειτουργίας του συστήματος με αυτόματο έλεγχο:

Λειτουργία υπό κατάσταση πρόληψης: Η δημιουργία εσωτερικών σπινθήρων αερίων καταλήγει άσκηση πίεσης στο κιβώτιο του μετασχηματιστή. Αυτό οδηγεί στη λειτουργία του διαφορικού ηλεκτρονόμου, της ανακουφιστικής διάταξης πίεσης και / ή του ηλεκτρονόμου Buchholz. Μόλις τα σφάλματα αυτά ανιχνευτούν, το οποίο είναι και το πρώτο στάδιο για την κατάσταση ενός μετασχηματιστή σε πυρκαγιά, μία προκαθορισμένη ποσότητα ελαίου από την κορυφή του κιβωτίου αποστραγγίζεται, κάτι το οποίο μειώνει την πίεση στο κιβώτιο.

Ταυτόχρονα, το λάδι του δοχείου προστασίας μονώνεται διαμέσου προ-τοποθετημένης βαλβίδας – η οποία δεν διαθέτει επιστροφή – και αέριο άζωτο αρχίζει να ψεκάζεται με μια προκαθορισμένη ροή και πίεση από το χαμηλότερο σημείο του κιβωτίου του μετασχηματιστή, ώστε να μειώσει την επιφανειακή θερμοκρασία του ελαίου.

Λειτουργία υπό κατάσταση εξάλειψης: Κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς μετασχηματιστή, η προ-τοποθετημένη βαλβίδα – η οποία δεν διαθέτει επιστροφή – λειτουργεί και απομονώνει το δοχείο προστασίας ελαίου, ώστε να αποτρέψει

περαιτέρω επιδείνωση και εξάπλωση της πυρκαγιάς. Πριν την ρήξη του κιβωτίου, η ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης και / ή ο ηλεκτρονόμος Buchholz λειτουργούν λόγω της αυξημένης πίεσης του κιβωτίου του μετασχηματιστή. Λόγω της πυρκαγιάς στο μετασχηματιστή, θα λειτουργήσει ο ανιχνευτής πυρκαγιάς. Κατόπιν της λήψης αυτών των σημάτων, προκαθορισμένη ποσότητα ελαίου θα αποστραγγιστεί. Ταυτόχρονα, αέριο άζωτο αρχίζει να ψεκάζεται σε προκαθορισμένη ροή και πίεση από το χαμηλότερο σημείο του κιβωτίου του μετασχηματιστή ώστε να μειώσει την επιφανειακή θερμοκρασία του ελαίου κάτω από το σημείο ανάφλεξης και να εξαλείψει την πυρκαγιά.

3.5.8.2 Απομακρυσμένος Χειροκίνητος Έλεγχος

Στην περίπτωση που το σύστημα αποτύχει να λειτουργήσει στην κατάσταση αυτόματης λειτουργίας, λόγω μη διαθεσιμότητας οποιουδήποτε εκ των σημάτων, ο διαχειριστής μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα χειροκίνητα, σπάζοντας το γυάλινο παράθυρο και θέτοντας σε λειτουργία το διακόπτη.

3.5.8.3 Τοπικός Χειροκίνητος Έλεγχος

Στην περίπτωση που το σύστημα αποτύχει να λειτουργήσει στην κατάσταση αυτόματης λειτουργίας ή στην κατάσταση απομακρυσμένου χειροκίνητου ελέγχου, λόγω μη διαθεσιμότητας οποιουδήποτε εκ των σημάτων ή αποτυχία της πηγής ισχύος, ο διαχειριστής μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα χειροκίνητα από το θάλαμο εξάλειψης πυρκαγιάς και να εξαφανίσει την πυρκαγιά.

3.5.9 Λεπτομέρειες του Εξοπλισμού του Συστήματος Πυροπροστασίας

Το σύστημα αποτελείται από ένα θάλαμο εξάλειψης πυρκαγιάς κοντά στο μετασχηματιστή, ένα κουτί ελέγχου μέσα στο δωμάτιο ελέγχου, αρκετούς ανιχνευτές πυρκαγιάς στο άνω μέρος του μετασχηματιστή, ειδικά σχεδιασμένη βαλβίδα απομόνωσης προστασίας του μετασχηματιστή μεταξύ του ηλεκτρονόμου Buchholz και του δοχείου λαδιού και κουτί επεξεργασίας σημάτων τοποθετημένο στο μετασχηματιστή. Ο θάλαμος εξάλειψης πυρκαγιάς (σχήμα 3.5.9-1 και σχήμα 3.5.9-2) είναι συνδεδεμένος με το κιβώτιο του μετασχηματιστή διαμέσου σωλήνων για την αποστράγγιση των ελαίων και τον ψεκασμό αζώτου. Καλωδιώσεις συνδέουν το κουτί επεξεργασίας σημάτων με το κουτί ελέγχου και το κουτί ελέγχου με το θάλαμο εξάλειψης πυρκαγιάς.



Σχήμα 3.5.9-1: Θάλαμος Εξάλειψης Πυρκαγιάς - Κουτί Ελέγχου



Σχήμα 3.5.9-2: Εσωτερικό του θαλάμου εξάλειψης πυρκαγιάς

3.5.10 Πλεονεκτήματα του συστήματος

Τα βασικά πλεονεκτήματα του συστήματος πυροπροστασίας είναι τα εξής:

- Το σύστημα μπορεί να ελεγχθεί σε μετασχηματιστές υπό τάση, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό για συμβατικά συστήματα.
- Είναι κατάλληλο για εσωτερική/εξωτερική εγκατάσταση.
- Πολλαπλά σήματα ενεργοποίησης, κάτι το οποίο εξαλείφει την πιθανότητα δυσλειτουργίας.
- Δεν επηρεάζεται από κλιματικές αλλαγές.
- Το σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί σε υπάρχοντες/εγκατεστημένους μετασχηματιστές με ελάχιστη προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας συνήθως 8 ώρες.
- Διαθέσιμη ένδειξη για χαμηλή πίεση αζώτου.
- Συναγερμός και οπτική ένδειξη για αποτυχία παροχής DC.
- Χαμηλής χρηματικής αξίας επένδυση συγκριτικά με συμβατικά συστήματα.
- Πολύ χαμηλή συντήρηση και έξοδα λειτουργίας συγκριτικά με συμβατικά συστήματα.
- Ελάχιστες μετά-την-πυρκαγιά και καθόλου δευτερεύουσες βλάβες.
- Ο χώρος που απαιτείται είναι μικρότερος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

3.5.11 Σύγκριση με παραδοσιακά συστήματα εξάλειψης πυρκαγιάς

Υπάρχουν και άλλα συστήματα όπως σύστημα ψεκασμού CO₂ και σύστημα ψεκασμού νερού για την προστασία μετασχηματιστή ενάντια στην πυρκαγιά, όμως δεν προτιμούνται εξαιτίας των ακόλουθων λόγων:

Σύστημα Ψεκασμού CO₂: Έλλειψη εφαρμογών, μεγάλου ύψους επένδυση, δύσκολο στη συντήρηση, μπορεί να προκαλέσει ασφυξία ανθρώπων.

Σύστημα ψεκασμού νερού: Κατανάλωση μεγάλης ποσότητας νερού, δύσκολο να συντηρηθεί διότι ο υδροσωλήνας σκουριάζει εύκολα και είναι εύκολο να φραχθεί, είναι μεγάλη επένδυση η αποθήκευση νερού σε κιβώτιο και η συλλογή του από το υπέδαφος, απαιτείται η αποσύνδεση του ηλεκτρισμού για την εξέταση και τη συντήρησή του.

3.5.12 Συμπεράσματα της δημοσίευσης

Με την προοδευτική αύξηση των MVA των μετασχηματιστών ηλεκτροκίνησης, που είναι εφοδιασμένοι με μεγάλες ποσότητες ελαίων, οι κίνδυνοι για πυρκαγιά και έκρηξη των μετασχηματιστών αυξάνονται βαθμιαία, με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η εγκατάσταση εξοπλισμού προστασίας. Το σύστημα πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες αζώτου για μετασχηματιστές

ηλεκτροκίνησης 30MVA 110kV/27kV έχει επιτυχημένα αναπτυχθεί εγχώρια. Με την εισαγωγή αυτού του προϊόντος, αναμένεται ότι ο μετασχηματιστής ηλεκτροκίνησης και ο περιβάλλοντας εξοπλισμός θα είναι προστατευμένοι ενάντια στην έκρηξη και ότι η πυρκαγιά στο μετασχηματιστή είναι πλέον ένας κίνδυνος απομακρυσμένος. Επίσης, θα επιτραπεί η γρήγορη εσωτερική επισκευή του μετασχηματιστή και θα μειωθεί ο χρόνος προγραμματισμένης διακοπής της λειτουργίας του υποσταθμού, ενώ θα αφήνει αβλαβές το περιβάλλον.

3.6 Πυροπροστασία Μετασχηματιστών Ισχύος με Σύστημα Συμπιεσμένου Αέρα – Αφρού

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται το σύστημα πυροπροστασίας μετασχηματιστών με τη χρήση ψεκαστών συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά (National Research Council of Canada – NRC) έχει αναπτύξει έναν τρόπο για την παραγωγή συμπιεσμένου αέρα – αφρού (compressed Air Foam – CAF) σε ένα σταθερό σύστημα σωλήνων. Το σύστημα αυτό παρέχει αφρό ανώτερης ποιότητας με ομοιόμορφη κατανομή και υψηλή ορμή. Με βάση προηγούμενες μελέτες, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά έχει αποδείξει με μεγάλης κλίμακας έρευνες ότι ο συμπιεσμένος αέρας – αφρός έχει ανώτερη επίδοση καταστολής της πυρκαγιάς σε σύγκριση με τον «απλό» αφρό ή τα συστήματα ψεκαστών (sprinkler). Ακόμη, διεξήχθη μία μελέτη για την ανάπτυξη ενός συστήματος διανομής συμπιεσμένου αέρα – αφρού και να εκτιμηθεί η ικανότητα καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος CAF για την προστασία των μετασχηματιστών ισχύος [11].

Σε αυτήν την εργασία περιγράφονται οι πειραματικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων του δοκιμαστικού σχεδίου και των διατάξεων ελέγχου του μετασχηματιστή ισχύος, και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ικανότητας καταστολής πυρκαγιάς του συστήματος CAF, για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος.

Στην αρχή γίνεται λόγος για τα συστήματα πυροπροστασίας που χρησιμοποιούν ψεκαστές με νερό, καθώς και ένα σύστημα αφρού απορρόφησης αέρα (air-aspirated foam system). Κατόπιν, εξηγείται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της ικανότητας καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται: η εγκατάσταση του δοκιμαστικού μετασχηματιστή ισχύος, οι διατάξεις ελέγχου που χρησιμοποιούνται, τα δοκιμαστικά καύσιμα, τα συστήματα καταστολής και η διαδικασία της ίδιας της δοκιμής. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα των δοκιμών και γίνονται κάποια σχόλια επί αυτών. Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία.

3.6.1 Πυροπροστασία μετασχηματιστών με σύστημα ψεκαστήρων με νερό, σύστημα αφρού απορρόφησης αέρα

Οι μετασχηματιστές ισχύος έχουν να κάνουν με ηλεκτρική ισχύ υπό υψηλή τάση και, ως εκ τούτου, πάντα υπάρχει η πιθανότητα περιστατικών πυρκαγιάς σε αυτούς. Λόγω, λοιπόν, της μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης πυρκαγιάς και λόγω του σημαντικού ρόλου που παίζουν στην παροχή ηλεκτρικής ισχύος στην κοινωνία, οι μετασχηματιστές ισχύος πρέπει να έχουν ένα κατάλληλο σύστημα πυροπροστασίας τοποθετημένο, ώστε να τους παρέχεται η καλύτερη δυνατή πυροπροστασία.

Τα διαδεδομένα συστήματα πυροπροστασίας για μετασχηματιστές ισχύος, που χρησιμοποιούν ψεκαστήρες (sprinklers), απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού, κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στην ηλεκτρική λειτουργία των μετασχηματιστών, όπως επίσης μπορεί να δημιουργήσει σπατάλη νερού και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο καθαρισμός, κατόπιν της καταστολής της πυρκαγιάς, είναι ένα ακόμη πρόβλημα. Οι μετασχηματιστές ισχύος περιέχουν επικίνδυνα υλικά και όλη η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της καταστολής της πυρκαγιάς πρέπει να μαζευτεί. Είναι μία δαπανηρή πρόταση το σύστημα να είναι εφοδιασμένο με υποδομή για συλλογή του νερού, που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της καταστολής της πυρκαγιάς ενός μετασχηματιστή ισχύος.

Μία ακόμη προσέγγιση πυροπροστασίας είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα αφρού απορρόφησης αέρα (air-aspirated foam system). Ωστόσο, τα τρέχοντα συστήματα αφρού απορρόφησης αέρα παράγουν χαμηλής ποιότητας αφρό και, ως εκ τούτου, μία μεγάλη ποσότητα αφρού είναι αναγκαία ώστε να παρέχεται επαρκής πυροπροστασία στους μετασχηματιστές ισχύος. Αυτό το σύστημα προκαλεί, επίσης, προβλήματα καθαρισμού κατόπιν της λειτουργίας του, καθυστερεί την επανεκκίνηση των μετασχηματιστών ισχύος και παρατείνει την διακοπή παροχής ισχύος στην κοινότητα.

Το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά (National Research Council of Canada – NRC) έχει αναπτύξει έναν τρόπο για την παραγωγή συμπιεσμένου αέρα – αφρού (compressed Air Foam – CAF) σε ένα σταθερό σύστημα σωλήνων. Το σύστημα αυτό παρέχει αφρό ανώτερης ποιότητας με ομοιόμορφη κατανομή και υψηλή ορμή. Σε προηγούμενες μελέτες, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας έχει αποδείξει με μεγάλης κλίμακας έρευνες ότι ο συμπιεσμένος αέρας – αφρός έχει ανώτερη επίδοση καταστολής της πυρκαγιάς σε σύγκριση με τον «απλό» αφρό ή τα συστήματα ψεκαστήρων (sprinkler). Ως εκ τούτου, το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού μπορεί να γίνει μία ιδανική λύση για την πυροπροστασία για μετασχηματιστές ισχύος, με την ανώτερη επίδοσή του στην καταστολή της πυρκαγιάς και τις χαμηλές απαιτήσεις του σε νερό, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τα προβλήματα καθαρισμού.

Πρόσφατα, διεξήχθη μία μελέτη για την ανάπτυξη ενός συστήματος διανομής συμπιεσμένου αέρα – αφρού και για την εκτίμηση της ικανότητας καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος CAF για την προστασία των μετασχηματιστών ισχύος. Αυτή η δημοσίευση περιγράφει τις πειραματικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων του δοκιμαστικού σχεδίου και των διατάξεων ελέγχου του μετασχηματιστή ισχύος, και παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα της

ικανότητας καταστολής πυρκαγιάς του συστήματος CAF για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος.

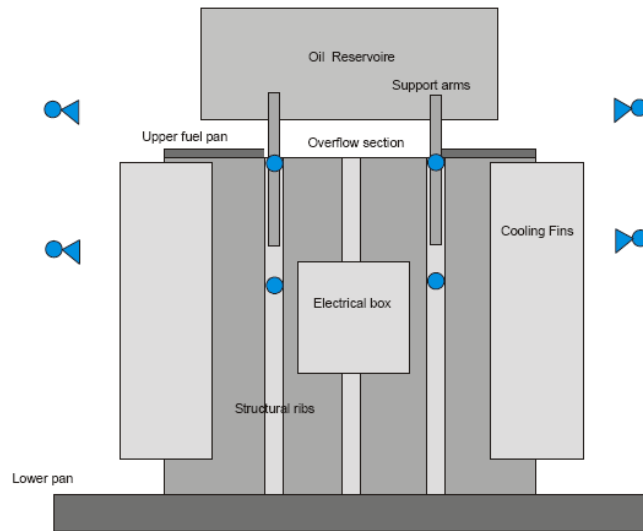
3.6.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Μία σειρά από ελέγχους μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να καθοριστεί η ικανότητα καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος συμπιεσμένου αέρα – αφρού, χρησιμοποιώντας μία δοκιμαστική κατασκευή μετασχηματιστή ισχύος. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ένας έλεγχος πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας, χρησιμοποιώντας ένα παραδοσιακό σύστημα βομβαρδισμού με νερό, ώστε να συγκριθούν οι ικανότητες καταστολής πυρκαγιάς των δύο συστημάτων για την πυροπροστασία μετασχηματιστή ισχύος.

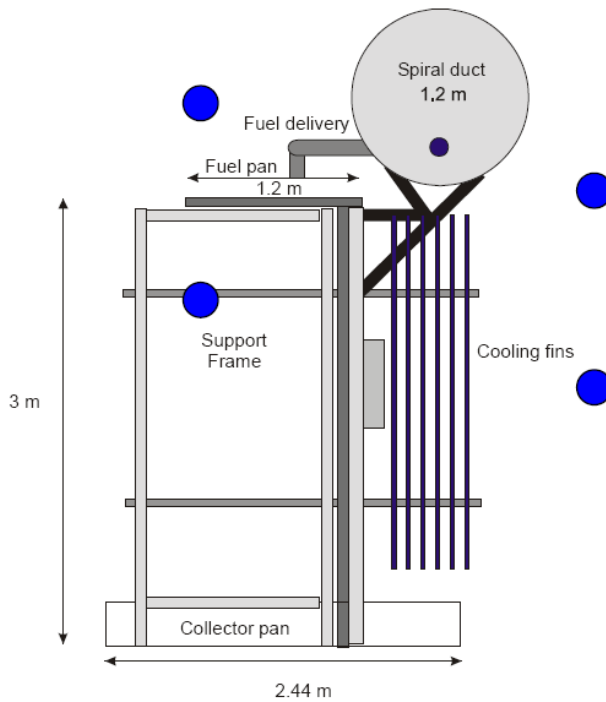
3.6.2.1 Εγκατάσταση Δοκιμαστικού Μετασχηματιστή Ισχύος

Ένας δοκιμαστικός μετασχηματιστής ισχύος κατασκευάστηκε για την πειραματική μελέτη. Ο δοκιμαστικός μετασχηματιστής ισχύος κατασκευάστηκε από 20 ατσάλινα ελάσματα συγκεκριμένης φόρμας, στερεωμένα σε ένα ατσάλινο κυλινδρικό πλαίσιο με πλάτος 3,9m επί βάθος 1,2m επί ύψος 3m. Αυτή ήταν μία αντιπροσωπευτική εκπροσώπηση ενός πραγματικού μετασχηματιστή ισχύος του σταθμού Hydro Quebec's Berri στο Montreal. Η δοκιμαστική διάταξη κατασκευάστηκε ώστε να αναπαραστήσει το εμπρόσθιο μέρος του μετασχηματιστή, συμπεριλαμβανομένων του δοχείου λαδιού και πτερυγίων ψύξης. Το εμπρόσθιο μέρος επιλέχθηκε διότι αντιπροσωπεύει περισσότερο αυστηρές προκλήσεις για τα συστήματα προστασίας, σε σχέση με το πίσω μέρος, λόγω περισσότερων εμποδίων στο μετασχηματιστή και επίσης έναν μεγαλύτερο κίνδυνο πυρκαγιάς με μία μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου. Το σχήμα 3.6.2.1-1 παρακάτω, δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του δοκιμαστικού μετασχηματιστή ισχύος.

Το σενάριο πυρκαγιάς που εξετάστηκε στην πυρκαγιά του μετασχηματιστή ισχύος ήταν μία έκρηξη στο κυρίως σώμα του μετασχηματιστή λόγω εσωτερικού τόξου, με αποτέλεσμα την έκρηξη ενός ηλεκτρικού μονωτήρα υψηλής τάσης από το πάνω μέρος του μετασχηματιστή ή την διάτρηση του κιβωτίου λαδιού του μετασχηματιστή διαρρέοντας λάδι στο πάνω μέρος του μετασχηματιστή. Το λάδι στο πάνω μέρος του μετασχηματιστή θα εμπλεκόταν με την πυρκαγιά και θα υπερεκχειλίζε το πλαϊνό και εμπρόσθιο μέρος του μετασχηματιστή ισχύος, δημιουργώντας «πύρινους» καταρράκτες και λιμνάζουσες πυρκαγιές γύρω από το μετασχηματιστή. Αυτό το χειρίστο σενάριο πυρκαγιάς για τον μετασχηματιστή ισχύος προσομοιώθηκε σε αυτήν την πειραματική εργασία.



● 8 CAF Nozzle Locations



Side view Transformer Setup

Scale 10mm = 0.3 m

Σχήμα 3.6.2.2-1: Σχηματικό διάγραμμα της δοκιμαστικής εγκατάστασης και της τοποθεσίας των ακροφυσίων συμπιεσμένου αέρα - αφρού

Αρκετά πύρινα μεταλλικά σκεύη κατασκευάστηκαν ώστε να προσδώσουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς στο πάνω μέρος, το κάτω, το κεντρικό και τα πλαϊνά της δοκιμαστικής κατασκευής. Το επάνω μεταλλικό μέρος είχε ένα σχίσμα προς το μπροστά τοίχο, ώστε να δημιουργήσει έναν καταρράκτη πυρκαγιάς πλάτους 1,8m, κάτω από το κιβώτιο λαδιού και ανάμεσα στα ψυκτικά πτερύγια. Αυτή είναι η περιοχή που πρέπει να θεωρείται ως η μεγαλύτερη πρόκληση για ένα σύστημα πυροπροστασίας. Το δοχείο λαδιού προσομοιώθηκε από έναν ατσάλινο κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου 1,2m και μήκους 2,1m. Ένας ατσάλινος σωλήνας 5cm με μήκος 9m χρησιμοποιήθηκε για να παρέχει με ασφάλεια το λάδι προς το πάνω μεταλλικό σκεύος, από ένα κυλινδρικό θερμαινόμενο δοχείο 205 λίτρων. Το λάδι έφτανε στο πάνω μεταλλικό σκεύος διαμέσου του σωλήνα λόγω της βαρύτητας με ρυθμό ροής περίπου 80 λίτρα/λεπτό. Το λάδι του άνω μεταλλικού σκεύους τότε υπερχειλίζει και έπεφτε στη δοκιμαστική διάταξη.

3.6.2.2 Διατάξεις ελέγχου

Τέσσερις αισθητήρες μέτρησης θερμοηλεκτρικής τάσης (thermocouples) εγκαταστάθηκαν στο δοκιμαστικό μετασχηματιστή ισχύος. Ένα ήταν τοποθετημένο πάνω από το κέντρο του άνω μεταλλικού σκεύους και ένα δεύτερο ήταν τοποθετημένο στο μέσο του χώρου μεταξύ του δοχείου λαδιού και του κυρίως σώματος του μετασχηματιστή. Τα άλλα δύο όργανα ήταν τοποθετημένα δίπλα στους δύο ανιχνευτές πυρκαγιάς του συστήματος βομβαρδισμού με νερό, το οποίο ήταν εγκατεστημένο στη δοκιμαστική διάταξη για πειραματική αξιολόγηση. Αυτό το σύστημα βομβαρδισμού με νερό, είχε την ίδια διάταξη, όπως εκείνο που ήταν στην πραγματικότητα εγκατεστημένο σε έναν υποσταθμό στο Montreal, για την προστασία μετασχηματιστών ισχύος.

Μετρητές θερμικής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν για να ελέγξουν τις ροές ακτινοβολίας από τις πυρκαγιές των μετασχηματιστών ισχύος. Ένας ιστός που περιείχε 5 μετρητές θερμικής ισχύος ήταν τοποθετημένος στα 6m από την εμπρόσθια γωνία της δοκιμαστικής διάταξης. Ο κατώτερος μετρητής ήταν τοποθετημένος στα 2,5m από το έδαφος, ο δεύτερος στα 3,75m, ο τρίτος στα 4,375m, ο τέταρτος στα 5m και ο υψηλότερος στα 6,25m. Όλοι οι μετρητές θερμικής ισχύος, εκτός από τον μεσαίο, ήταν τοποθετημένοι στα 6m από την εμπρόσθια γωνία της δοκιμαστικής διάταξης. Ο μεσαίος μετρητής ήταν στα 5,375m από την εμπρόσθια γωνία της δοκιμαστικής διάταξης.

Δύο βιντεοκάμερες χρησιμοποιήθηκαν επίσης για οπτική καταγραφή των πειραμάτων. Η μία ήταν τοποθετημένη στα 4m απόσταση από την επάνω εμπρόσθια γωνία της δοκιμαστικής διάταξης και η δεύτερη ήταν στο επίπεδο του εδάφους κοντά στην εμπρόσθια γωνία.

3.6.2.3 Δοκιμαστικά καύσιμα

Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά μονωτικά λάδια, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στους μετασχηματιστές ισχύος. Το ηλεκτρικά μονωτικό λάδι που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ήταν το Voltesso 35, το οποίο

παράγεται από την Imperial Oil. Το Voltesso 35 έχει μία πυκνότητα 877kg/m^3 στους 15°C και το σημείο ανάφλεξης του είναι 150°C . Η φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας του μονωτικού λαδιού στο μετασχηματιστή ισχύος είναι 75°C . Ως εκ τούτου, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, το ηλεκτρικά μονωτικό λάδι προθερμάνθηκε στους 75°C , πριν αναφλεγεί για τη δοκιμή.

3.6.2.4 Συστήματα Καταστολής

Για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος αναπτύχθηκε ένα σύστημα διανομής συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Διάφορες διατάξεις συμπιεσμένου αέρα – αφρού εξετάστηκαν, ώστε να καθοριστεί ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την κατανομή αφρού γύρω από τα κάθετα και οριζόντια εμπόδια του μετασχηματιστή ισχύος. Το τελικό σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού που επιλέχθηκε για αυτήν την εργασία, ενσωμάτωσε δύο τύπους ακροφυσίων: ακροφύσιο μεγάλης ροής με περιστροφικό γρανάζι (Large Flow Gear Driven Rotary – GDR) και ακροφύσιο μικρής ροής με επίδραση περιστροφικού στροβίλου (Small Flow Turbine Action Rotary – TAR). Χρησιμοποιήθηκαν από 3 έως 8 ακροφύσια TAR στις διατάξεις συμπιεσμένου αέρα – αφρού στις δοκιμές για την καταστολή της πυρκαγιάς της δοκιμαστικής εγκατάστασης. Χρησιμοποιήθηκαν 2 ακροφύσια GDR στη διάταξη συμπιεσμένου αέρα – αφρού για τη δοκιμή. Ο συμπιεσμένος αέρας – αφρός παραγόταν χρησιμοποιώντας σύστημα FireFlex ICAF (Integrated Compressed Air Foam).

Για το σύστημα τεσσάρων ακροφυσίων συμπιεσμένου αέρα – αφρού, από ένα ακροφύσιο TAR ήταν τοποθετημένο σε καθεμία από τις δύο πλευρές της δοκιμαστικής εγκατάστασης και δύο ακροφύσια TAR χρησιμοποιήθηκαν για την προστασία του εμπρόσθιου μέρους της δοκιμαστικής εγκατάστασης. Στο σύστημα 3 ακροφυσίων, από ένα ακροφύσιο χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μία πλευρά και ένα μόνο στο εμπρόσθιο μέρος της δοκιμαστικής εγκατάστασης. Για το σύστημα των 8 ακροφυσίων, από δύο ήταν τοποθετημένα σε καθεμία πλευρά (ένα κοντά στην κορυφή ψεκάζοντας την και ένα κάτω από αυτό ψεκάζοντας τον πλαϊνό τοίχο) και τέσσερα ήταν τοποθετημένα στο εμπρόσθιο μέρος (δύο στο ύψος της κορυφής και δύο χαμηλότερα). Στο σχήμα 3.6.2.2-1, φαίνονται και οι τοποθεσίες των 8 ακροφυσίων.

Για το σύστημα ακροφυσίων GDR, ένα ακροφύσιο τοποθετήθηκε στο αριστερό μέρος κι ένα στο εμπρόσθιο μέρος της δοκιμαστικής εγκατάστασης. Και τα δύο ακροφύσια ήταν τοποθετημένα πάνω από το ύψος της κορυφής της δοκιμαστικής εγκατάστασης, ψεκάζοντας προς τα κάτω υπό μία γωνία. Το δεξί μέρος της δοκιμαστικής εγκατάστασης δεν προστατευόταν σε αυτή τη δοκιμή, με την υπόθεση ότι, αυτό το μέρος της δοκιμαστικής εγκατάστασης μπορεί να προστατευτεί από ένα σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού, το οποίο προστατεύει το πίσω μισό του μετασχηματιστή ισχύος.

Μία δοκιμή, επίσης, διεξήχθη χρησιμοποιώντας ένα σύστημα βομβαρδισμού με νερό, για σύγκριση με το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Το σύστημα βομβαρδισμού με νερό που δοκιμάστηκε, ήταν παρόμοιο με αυτό που είναι εγκατεστημένο σε έναν πραγματικό μετασχηματιστή ισχύος στο Hydro's Quebec's Berri Station στο Montreal. Το σύστημα βομβαρδισμού με νερό αποτελούνταν από έναν δακτύλιο 21 ακροφυσίων, με μία ικανότητα ροής 910λίτρα/λεπτό .

3.6.2.5 Διαδικασία Δοκιμής

Τα καύσιμα της δοκιμής του επάνω σκεύους αναφλέχθηκαν τη χρονική στιγμή 0 και κατά σειρά αναφλέχθηκαν τα καύσιμα του πλαϊνού και του εμπρόσθιου σκεύους. Στα 30sec, επιτράπηκε στο καύσιμο να ρεύσει πάνω στο σκεύος της κορυφής, με έναν ρυθμό ροής της τάξης των 80λίτρων/λεπτό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υπερχείλιση του καυσίμου του επάνω σκεύους και την πτώση του στο μπροστινό μέρος της δοκιμαστικής εγκατάστασης, προκαλώντας έναν καταρράκτη πυρκαγιάς στο εμπρόσθιο μέρος. Περίπου στα 1 λεπτό και 10 δευτ., όταν η φλόγα από το εμπρόσθιο σκεύος είχε αναπτυχθεί πλήρως σε μία φλόγα όπου το ύψος έφτανε στην κορυφή της δοκιμαστικής εγκατάστασης και οι φλόγες επιτίθονταν στα πλαϊνά του δοχείου λαδιού, το σύστημα συμπιεσμένου αδρού – νερού ή το σύστημα βομβαρδισμού με νερό ενεργοποιήθηκε για να ελέγξει την πυρκαγιά. Οι ενέργειες καταστολής συνεχίστηκαν μέχρι την πλήρη εξάλειψη της πυρκαγιάς. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφηκαν ο ρυθμός ροής του διαλύματος του συστήματος καταστολής, οι ενδείξεις θερμοκρασίας από διάφορα σημεία της δοκιμαστικής διάταξης, οι ροές θερμικής ακτινοβολίας της πυρκαγιάς, ο χρόνος καταστολής της πυρκαγιάς (99% εξάλειψη) και ο χρόνος πλήρους εξάλειψης.

3.6.3 Αποτελέσματα και σχόλια

Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας από την πυρκαγιά του μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές δεν μετρήθηκε, διότι ήταν πολύ υψηλός για το όργανο μέτρησης της θερμότητας. Το συνολικό μέγεθος της δοκιμαστικής πυρκαγιάς εκτιμήθηκε περίπου στα 5MW, βασισμένο στο μέγεθος (οπτικά) της φλόγας και συγκρίνοντάς το με γνωστές πυρκαγιές υγρών καυσίμων.

Ο πίνακας 3.6.3-1, που φαίνεται παρακάτω, δείχνει συνοπτικά τις συνθήκες της δοκιμής και τα αποτελέσματα της καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος βομβαρδισμού με νερό και του συστήματος συμπιεσμένου αέρα – αφρού για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος.

Στη Δοκιμή #1, το σύστημα βομβαρδισμού με νερό εξάλειψε την πυρκαγιά σε 3 λεπτά και 53 δευτερόλεπτα. Το σύστημα βομβαρδισμού με νερό είχε 21 ακροφύσια ψεκασμού και ο συνολικός ρυθμός ροής ήταν 910 λίτρα/λεπτό. Το καύσιμο ήταν λάδι μετασχηματιστή (Votesso 35), το οποίο προθερμάνθηκε στους 75°C πριν την έναρξη της δοκιμής. Το σύστημα βομβαρδισμού με νερό χρειάστηκε 2 λεπτά και 5 δευτερ. για να ελέγξει (99% εξάλειψη) την πυρκαγιά, εξαλείφοντάς την στα 3 λεπτά και 53 δευτερόλεπτα. Αυτή η επίδοση καταστολής πυρκαγιάς του συστήματος βομβαρδισμού με νερό θα είναι η βάση της σύγκρισης για όλα τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα – αφρού, που ερευνώνται σε αυτήν την εργασία.

# Δοκιμής	1	2	3	4	5	6
Περιγραφή	Deluge	CAF	CAF	CAF	CAF	CAF
Τύπος ακροφυσίου	sprinkler	TAR	TAR	TAR	GDR	TAR
# ακροφυσίων	21	4	3	3	2	8
Τύπος αφρού	-	Class A	Class A	Class B	Class B	Class B
Συμπύκνωση αφρού (%)	0	1	1	2	2	2
Ρυθμός ροής (λίτρα/λεπτό)	910	88	66	66	160	160
Προθέρμανση (°C)	75	76,5	76	77	75	75
Χρόνος προανάφλεξης (λεπτά:δευτερόλεπτα)	1:20	1:21	1:27	2:26	1:25	1:15
Χρόνος καταστολής (λεπτά:δευτερόλεπτα.)	2:05	1:09	2:16	1:21	1:33	1:13
Χρόνος εξάλειψης (λεπτά:δευτερόλεπτα.)	3:53	1:24*	4:02	2:54	1:58	1:29

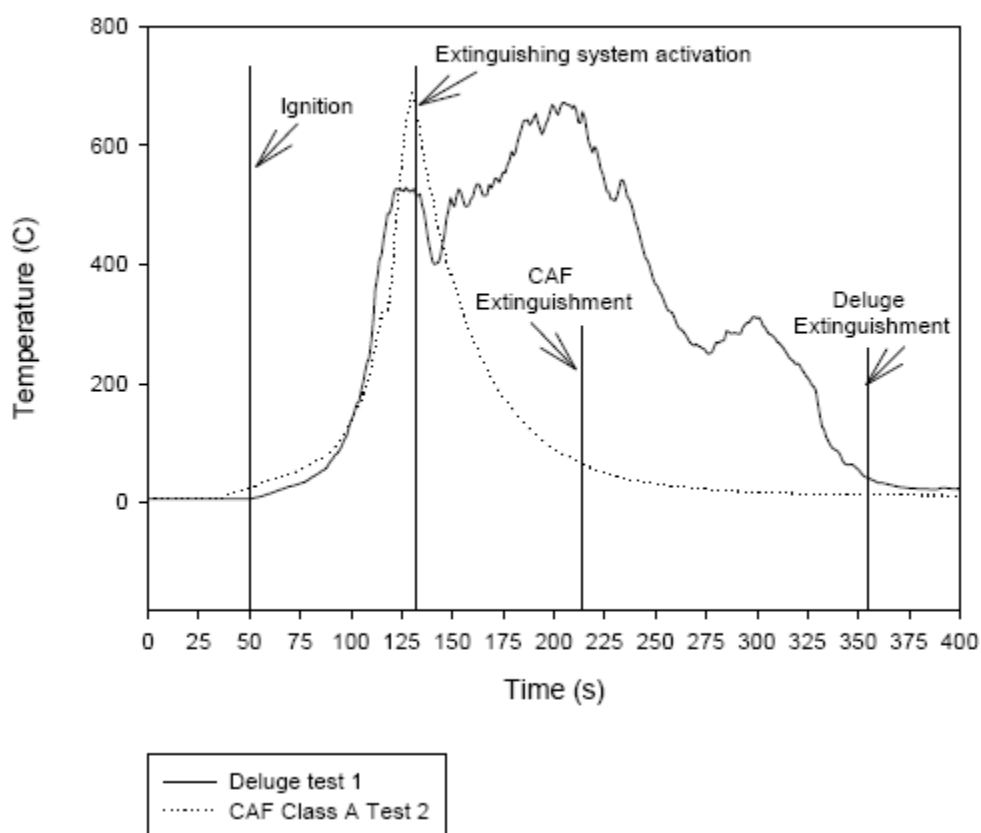
Πίνακας 3.6.3-1: συνθήκες της δοκιμής και αποτελέσματα της καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος βομβαρδισμού με νερό και του συστήματος συμπιεσμένου αέρα – αφρού για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος

*το πλαϊνό σκεύος δεν έλαβε αφρό και έμεινε να καίγεται

Στη Δοκιμή #2, 4 ακροφύσια TAR χρησιμοποιήθηκαν για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Ο συνολικός ρυθμός ροής ήταν 88 λίτρα/λεπτό και χρησιμοποιήθηκε αφρός τύπου A συμπύκνωσης 1%. Το καύσιμο ήταν λάδι μετασχηματιστή, προθερμασμένο στους 76,5°C. Το σύστημα αυτό έλεγξε την πυρκαγιά στο 1 λεπτό και 9 δευτερόλεπτα. και εξάλειψε το μεγαλύτερο μέρος της, εκτός από ένα μικρό σκεύος στο πλάι, σε 1 λεπτό και 24 δευτερόλεπτα. Η κατανομή του αφρού δεν ήταν η ιδανική και το μικρό πλαϊνό σκεύος δεν εξέλαβε κατάλληλη πυκνότητα αφρού και αφέθηκε να καίγεται. Σε μεταγενέστερες δοκιμές, το πλαϊνό ακροφύσιο του συστήματος TAR συμπιεσμένου αέρα – αφρού, προσαρμόστηκε ώστε να βελτιώσει την κατανομή του αφρού.

Το σχήμα 3.6.3-1, που φαίνεται παρακάτω, δείχνει τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στο χώρο μεταξύ του εμπρόσθιου άνω άκρου και του δοχείου λαδιού του δοκιμαστικού μετασχηματιστή, κατά τη διάρκεια της καταστολής της πυρκαγιάς από το σύστημα βομβαρδισμού με νερό (δοκιμή #1) και από το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού (δοκιμή #2). Αυτές οι θερμοκρασίες δείχνουν την κατάσταση της φλόγας στο εμπρόσθιο μέρος της δοκιμαστικής διάταξης. Το σχήμα δείχνει ότι υπήρξε μία αρχική έκλαμψη της πυρκαγιάς με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό, όταν με το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού υπήρξε μία αξιόλογη μείωση της θερμοκρασίας, μόλις αυτό ενεργοποιήθηκε.

Plume temperature (C) Deluge and CAF



Σχήμα 3.6.3-1: Θερμοκρασία του άνω εμπρόσθιου μέρους σε σχέση με το χρόνο (δοκιμές #1 και #2)

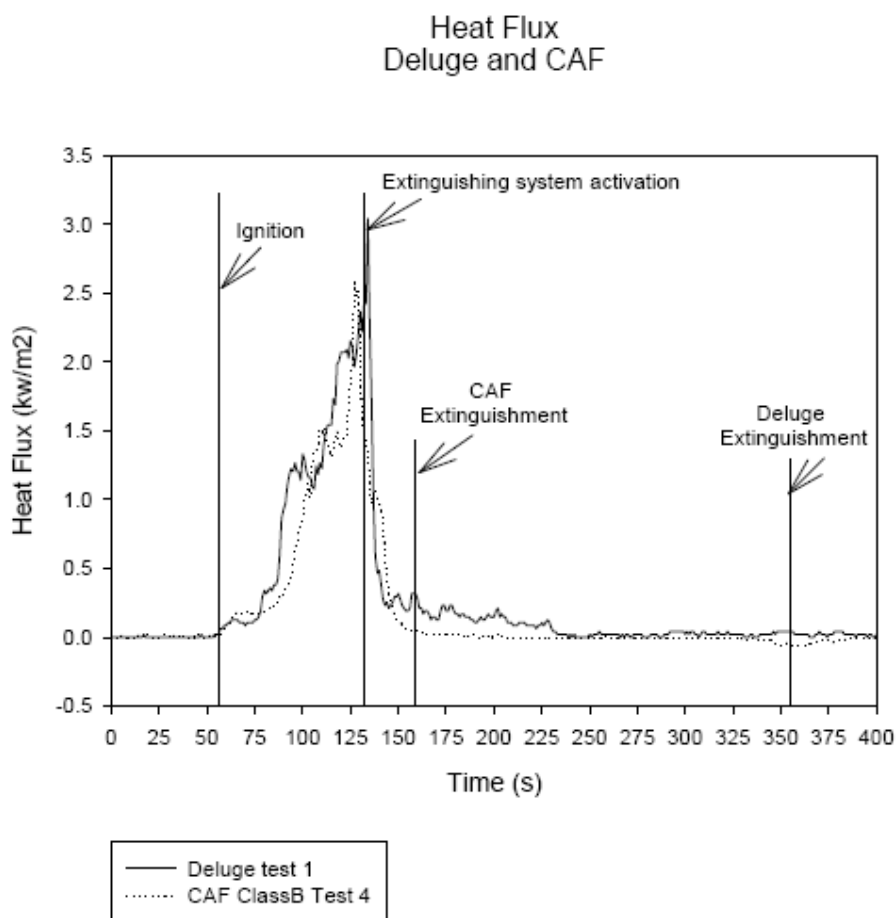
Στη Δοκιμή #3, 3 ακροφύσια TAR χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα συμπιεσμένου αέρα - αφρού, με τη γωνία του πλαϊνού ακροφυσίου προσαρμοσμένη ώστε να βελτιωθεί η κατανομή του αφρού. Το σύστημα 3 ακροφυσίων TAR είχε μόνο 1 ακροφύσιο στο εμπρόσθιο τμήμα της δοκιμαστικής κατασκευής, σε αντίθεση με τα 2 της δοκιμής #2. Ο συνολικός ρυθμός ροής ήταν 66 λίτρα/λεπτό και η συμπύκνωση του αφρού και το καύσιμο ήταν τα ίδια με τη δοκιμή #2. Το σύστημα αυτό έθεσε υπό έλεγχο την πυρκαγιά στα 2 λεπτά και 16 δευτερόλεπτα και την εξάλειψε στα 4 λεπτά και 2 δευτερόλεπτα. Η δοκιμή έδειξε παρόμοια επίδοση καταστολής πυρκαγιάς σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό, ωστόσο, το σύστημα συμπιεσμένου αέρα - αφρού χρησιμοποίησε λιγότερο από 8% του ρυθμού ροής νερού του συστήματος βομβαρδισμού με νερό.

Η Δοκιμή #4 ήταν παρόμοια με τη δοκιμή #3, εκτός από το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε αφρός τύπου B, αντί για αφρό τύπου A. Επίσης, στη δοκιμή #4, ο χρόνος προανάφλεξης αυξήθηκε στα 2 λεπτά και 26 δευτερόλεπτα, κάτι το οποίο έκανε την πυρκαγιά να διογκωθεί και να δώσει μία μεγαλύτερη πρόκληση στο σύστημα καταστολής. Ακόμη όμως και με μεγαλύτερη πυρκαγιά, το σύστημα συμπιεσμένου αέρα - αφρού με 3 ακροφύσια TAR, το οποίο χρησιμοποιεί αφρό

τύπου Β συμπύκνωσης 2%, εξάλειψε την πυρκαγιά του μετασχηματιστή σε 2 λεπτά και 54 δευτερόλεπτα.

Η Δοκιμή #5 χρησιμοποίησε 2 ακροφύσια GDR. Το λάδι του μετασχηματιστή προθερμάνθηκε στους 75°C και η προανάφλεξη διήρκεσε 1 λεπτό και 25 δευτερ. Το σύστημα συμπιεσμένου αφρού – αέρα χρησιμοποιώντας αφρό τύπου Β συμπύκνωσης 2%, ήλεγξε την πυρκαγιά σε 1 λεπτό και 33 δευτερόλεπτα και την εξάλειψε σε 1 λεπτό και 58 δευτερόλεπτα.

Στη Δοκιμή #6 χρησιμοποιήθηκαν 6 ακροφύσια TAR. Το λάδι του μετασχηματιστή προθερμάνθηκε στους 75°C και η προανάφλεξή του διήρκεσε 1 λεπτό και 15 δευτερ. Το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού χρησιμοποιώντας αφρό τύπου Β συμπύκνωσης 2%, ήλεγξε την πυρκαγιά σε 1 λεπτό και 13 δευτερόλεπτα και την εξάλειψε σε 1 λεπτό και 29 δευτερόλεπτα. Το σχήμα 3.6.3-2, που φαίνεται παρακάτω, δείχνει τη ροή θερμικής ισχύος (πυκνότητα θερμικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας) που μετρήθηκε από έναν μετρητή τοποθετημένο στα 5,375m απόσταση από την εμπρόσθια γωνία της δοκιμαστικής διάταξης και 4,375m πάνω από το έδαφος. Δείχνει μία απότομη μείωση της τιμής της ροής θερμικής ισχύος μόλις ενεργοποιηθεί κάθε ένα από τα συστήματα, ωστόσο, δείχνει επίσης μία πολύ γρηγορότερη εξάλειψη όταν χρησιμοποιούμε σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού, σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό.



Σχήμα 3.6.3-2: Πυκνότητα θερμικής ισχύος σε σχέση με το χρόνο (δοκιμές #1 και #6)

3.6.4 Συμπεράσματα της δημοσίευσης

Συστήματα συμπιεσμένου αέρα – αφρού με 3 ή 4 ακροφύσια TAR και συστήματα με 2 ακροφύσια GDR αναπτύχθηκαν για την προστασία των μετασχηματιστών ισχύος. Μία σειρά από δοκιμές πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας μία δοκιμαστική διάταξη, η οποία αναπαριστά το μισό μέρος ενός μετασχηματιστή ισχύος, ώστε να μετρηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος βομβαρδισμού με νερό και των συστημάτων συμπιεσμένου αέρα – αφρού, όσον αφορά στην προσομοίωση της εξάλειψης μιας μεγάλης πυρκαγιάς μετασχηματιστή ισχύος, χρησιμοποιώντας αφρό τύπου A και τύπου B.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού, είτε με 2 μεγάλα ακροφύσια GDR είτε με 3 ή 4 μικρά ακροφύσια TAR, είχε καλύτερη επίδοση, σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό, που χρησιμοποιούσε 21 sprinklers. Το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού με 3 ακροφύσια TAR, χρησιμοποιώντας αφρό τύπου A συμπύκνωσης 1%, εξάλειψε την πυρκαγιά σε 4 λεπτά και 2 δευτερόλεπτα, χρόνο παρόμοιο με τα αποτελέσματα του συστήματος βομβαρδισμού με νερό. Ωστόσο, το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού χρησιμοποίησε λιγότερο από 8% της συνολικής ροής νερού, σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό.

Το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού με 2 ακροφύσια GDR, χρησιμοποιώντας αφρό τύπου B συμπύκνωσης 2%, εξάλειψε την πυρκαγιά σε 1 λεπτό και 58 δευτερόλεπτα, που είναι σχεδόν το ήμισυ του χρόνου εξάλειψης πυρκαγιάς του συστήματος βομβαρδισμού με νερό. Και ακόμη, χρησιμοποιήθηκε 18% μικρότερος ρυθμός ροής νερού σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό. Το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού με 8 ακροφύσια TAR, χρησιμοποιώντας αφρό τύπου B συμπύκνωσης 2%, εξάλειψε την πυρκαγιά σε χρόνο 1 λεπτό και 29 δευτερόλεπτα, με πολύ λιγότερες απαιτήσεις νερού σε σχέση με το σύστημα βομβαρδισμού με νερό.

Η μελέτη αυτή, δείχνει ότι το σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη πυροπροστασία σε μετασχηματιστές ισχύος, πιο αποτελεσματικά, με πολύ λιγότερες απαιτήσεις νερού, σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό σύστημα βομβαρδισμού με νερό.

3.7 Εκτίμηση κινδύνου πυροπροστασίας μετασχηματιστή σε ένα τυπικό πολυώροφο κτίριο της Νέας Ζηλανδίας

Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται μία μελέτη, η οποία παρουσιάζει μία Ποσοτική Εκτίμηση Κινδύνου (FRA) σε μια πυρκαγιά μετασχηματιστή, που ξεκινάει σε έναν υποσταθμό διανομής, σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή με εμπορικά κτίρια πολλαπλών χρήσεων [12]. Αυτή η μελέτη εξετάζει τα χαρακτηριστικά ιστορικών δεδομένων για πυρκαγιές μετασχηματιστών σε υποσταθμούς διανομής, τόσο στα κτίρια της Νέας Ζηλανδίας, όσο και σε αυτά των Η.Π.Α. Η αξιοπιστία των συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας, όπως ανιχνευτές καπνού και πυροσβεστικοί ψεκαστήρες οροφής, μελετώνται σε αυτήν την έρευνα.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων, μία προσέγγιση του κινδύνου πυρκαγιάς καθορίζεται χρησιμοποιώντας μία ανάλυση δέντρου γεγονότων για ένα σύνολο 14 περιπτώσεων, με διαφορετικούς σχεδιασμούς πυροπροστασίας και διαφορετικούς τύπους μετασχηματιστών για έναν υποσταθμό διανομής, σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή με εμπορικά κτίρια πολλαπλών χρήσεων. Στα σενάρια 1 έως 10, αξιολογούνται διαφορετικοί συνδυασμοί συστημάτων πυροπροστασίας με τον ίδιο τύπο μετασχηματιστή (μετασχηματιστής ελαίου). Στα σενάρια 11 έως 14, δύο συγκεκριμένα σχέδια πυροπροστασίας έχουν επιλεγεί ως βάση για την ανάλυση διαφορετικών τύπων μετασχηματιστών. Δύο τύποι μετασχηματιστών με χαμηλό κίνδυνο πυρκαγιάς χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τον μετασχηματιστή εύφλεκτου μονωτικού υγρού (ορυκτού ελαίου) σε έναν υποσταθμό διανομής. Αυτοί είναι: μετασχηματιστές λιγότερου εύφλεκτου μονωτικού υγρού (silicone oil) και ξηρού τύπου μετασχηματιστές.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δέντρου γεγονότων χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κόστους-ωφέλειας. Οι λόγοι κόστους-ωφέλειας μετρώνται βάση του μειωμένου κινδύνου έκθεσης σε πυρκαγιά για τους κατοίκους του κτιρίου, όσον αφορά στα κόστη επένδυσης των διαφορετικών περιπτώσεων, σε σχέση με την αντίστοιχη βασική περίπτωση.

3.7.1 Μετασχηματιστές: ταξινόμηση και κίνδυνος πυρκαγιάς

Γενικά, ένας μετασχηματιστής 750kVA μπορεί να υποστηρίξει περίπου 60 έως 130 οικογένειες ή καταστήματα ανάλογα με τον καιρό, την εποχή, τον αριθμό ενοίκων και τη χρήση ισχύος των ενοίκων. Λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού και της υψηλότερης πυκνότητας φορτίου στη Νέα Ζηλανδία κάθε έτος, χτίζονται όλο και περισσότερες πολυκατοικίες. Χαρακτηριστικά, μια πολυκατοικία που περιέχει περισσότερες από 40 οικογένειες ή καταστήματα είναι πιθανό να έχει το μετασχηματιστή της εγκατεστημένο μέσα ή προσαρτημένο/εφαπτόμενο στο κτίριο. Σε αυτήν την περίπτωση, το σχέδιο πυρασφάλειας των υποσταθμών διανομής μπορεί να γίνει ένα σημαντικό ζήτημα προς αντιμετώπιση για την ελαχιστοποίηση του πιθανού κινδύνου για τα μέλη του κοινού.

Τρεις τύποι μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται συνήθως στην αγορά. Αυτοί είναι: (1) μετασχηματιστές ξηρού τύπου, (2) μετασχηματιστές λιγότερο εύφλεκτοι μονωμένοι με υγρό και (3) εύφλεκτοι μονωμένοι με υγρό μετασχηματιστές. Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι μετασχηματιστές που περιέχουν στερεό ή αέριο μονωτικό υλικό. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς των μετασχηματιστών ξηρού τύπου, θεωρείται γενικά χαμηλός, συγκριτικά με τους μετασχηματιστές υγρού τύπου, λόγω του περιορισμένου ποσού καύσιμων υλικών που βρίσκονται στους μετασχηματιστές. Για τους μετασχηματιστές υγρού τύπου, το λιγότερο εύφλεκτο υγρό αναμένεται να έχει ένα υψηλό σημείο ανάφλεξης (άνω των 300°C) και ως εκ τούτου, είναι δυσκολότερο να αναφλεχθεί. Από την άποψη του κινδύνου πυρκαγιάς, οι μετασχηματιστές που μονώνονται με εύφλεκτο υγρό, θεωρούνται ότι έχουν τον υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς από τους τρεις τύπους μετασχηματιστών, λόγω της παρουσίας του εύφλεκτου υγρού ελαίου και του σχετικά χαμηλότερου σημείου ανάφλεξής τους (100°C έως 170°C).

Από τη βιβλιογραφία είναι κατανοητό ότι οι μετασχηματιστές είναι αξιόπιστοι. Η βλάβη των μετασχηματιστών, ως αποτέλεσμα πυρκαγιάς, θεωρείται πολύ απίθανη. Εντούτοις, μόλις εμφανιστεί η πυρκαγιά μετασχηματιστών, ο πιθανός αντίκτυπος στην ασφάλεια ζωής, την ιδιοκτησία και το περιβάλλον, θα μπορούσε να είναι πολύ υψηλός.

Ο κίνδυνος πυρκαγιάς μετριέται γενικά βασισμένος στο μέγεθος των φορτίων πυρκαγιάς στην οριζόμενη περιοχή. Στους υποσταθμούς διανομής, η πυκνότητα φορτίου πυρκαγιάς μπορεί να ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με τους τύπους μετασχηματιστών. Παραδείγματος χάριν, ο υποσταθμός διανομής που αποτελείται από έναν μετασχηματιστή ξηρού τύπου, αναμένεται να έχει χαμηλή πυκνότητα φορτίου πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων ισχύος και των ηλεκτρικών συστατικών και, ως εκ τούτου, ο κίνδυνος πυρκαγιάς στον υποσταθμό διανομής είναι χαμηλός. Από την άλλη, όταν ο υποσταθμός διανομής αποτελείται από έναν μετασχηματιστή υγρού τύπου, αναμένεται υψηλή πυκνότητα φορτίου πυρκαγιάς, λόγω της παρουσίας ελαίων μετασχηματιστή. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κίνδυνος πυρκαγιάς στον υποσταθμό διανομής θεωρείται υψηλός.

Η ταξινόμηση των διαφορετικών τύπων μετασχηματιστών, όσον αφορά στον κίνδυνο πυρκαγιάς, παρουσιάζεται ακολούθως:

1. Χαμηλός κίνδυνος: Ο υποσταθμός διανομής αποτελείται από τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου (π.χ. ξηρός αέρας) και το συνδεδεμένο ηλεκτρικό εξοπλισμό
2. Υψηλός κίνδυνος: Ο υποσταθμός διανομής αποτελείται από τους μονωμένους μετασχηματιστές λιγότερο εύφλεκτου υγρού (π.χ. έλαιο σιλικόνης) και το συνδεδεμένο ηλεκτρικό εξοπλισμό
3. Πολύ υψηλός κίνδυνος: Ο υποσταθμός διανομής αποτελείται από τους μονωμένους μετασχηματιστές εύφλεκτου υγρού (π.χ. ορυκτού ελαίου) και το συνδεδεμένο ηλεκτρικό εξοπλισμό

Μια ανασκόπηση από τον Nyman, έχει εξετάσει τις απαιτήσεις πυρασφάλειας που προτείνονται από το NZFS (New Zealand Fire Service). Ο Nyman [Nyman, J., Private Communication, 2005] διαπίστωσε ότι οι απαιτήσεις πυρασφάλειας NZFS για τους υποσταθμούς διανομής, προτείνονται βάσει μιας αναθεώρησης της εμπειρίας και της γνώσης τους που συσσωρεύονται κατά τη διάρκεια των ετών. Τον Nyman τον απασχόλησε, ότι μια από τις απαιτήσεις σχετικά με τον τετράωρο διαχωρισμό πυρκαγιάς μεταξύ του υποσταθμού διανομής και των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, μπορεί να μην είναι απαραίτητη, κατά την εξέταση της έκθεσης κινδύνου των ενοίκων του κτιρίου σε διαφορετικές καταστάσεις, όπως η ανάμιξη των συστημάτων ψεκαστήρα και η χρήση των μετασχηματιστών με έναν χαμηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς.

Οι εσωτερικοί υποσταθμοί διανομής συνίσταται συχνά να βρίσκονται στο ισόγειο, που παρέχει άμεση πρόσβαση στο εξωτερικό του κτιρίου, καθώς και για να διαχωρίζονται σε πυρκαγιά από τους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου. Η εσωτερική πρόσβαση μπορεί ή όχι να παρέχεται, ανάλογα με τους περιορισμούς της εγκατάστασης. Ο πιθανός κίνδυνος πυρκαγιών μετασχηματιστών για τους ενοίκους του κτιρίου, είναι ότι η πυρκαγιά και ο καπνός μπορεί να διαδοθούν από τον υποσταθμό διανομής μέσω του τοίχου διαχωρισμού, λόγω βλάβης της κατασκευής, ή εσφαλμένης εισχώρησης της πυρκαγιάς μέσω κάποιας πόρτας. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ελεγχθεί ή να περιοριστεί η πυρκαγιά και ο καπνός μετασχηματιστή στο δωμάτιο, προκειμένου να παρέχεται αρκετός χρόνος για τους ενοίκους του κτιρίου να διαφύγουν ακίνδυνα χωρίς έκθεση τους σε οποιοδήποτε συνθήκες.

Αυτή η έρευνα διεξάγει μια ποσοτική αξιολόγηση του κινδύνου (Quantitative Risk Assessment – QRA) μιας πυρκαγιάς μετασχηματιστή σε ένα χαρακτηριστικό πολυώροφο αστικό και εμπορικό κτίριο πολλαπλής χρήσης της Νέας Ζηλανδίας, όταν εφαρμόζονται διαφορετικά σχέδια πυρασφάλειας και τύποι μετασχηματιστή στον εσωτερικό υποσταθμό διανομής. Στο συμπέρασμα της έκθεσης, μια σύσταση σχετικά με τα πιο κατάλληλα συστήματα πυροπροστασίας για έναν εσωτερικό υποσταθμό διανομής παρέχεται ως αποτέλεσμα της ανάλυσης κόστους – οφέλους. Οι αναλογίες κόστους – οφέλους μετριούνται βασισμένες στην Ισοδύναμη Νομισματική Αξία της μείωσης κινδύνου πυρκαγιάς, όσον αφορά στις δαπάνες των συνδυασμών των συστημάτων πυρασφάλειας για τις εναλλακτικές περιπτώσεις, σε σχέση με την αντίστοιχη θεμελιώδη περίπτωση. Σε αυτήν την έρευνα η ανάλυση

κόστους – οφέλους δεν εξετάζει τη ζημία ιδιοκτησίας, απώλεια επιχείρησης ή ζημία περιβάλλοντος λόγω των πυρκαγιών μετασχηματιστή και της καταστολής πυρκαγιάς.

3.7.2 Στόχος της έρευνας

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της έρευνας είναι να αξιολογήσει εάν ο τετράωρος διαχωρισμός πυρκαγιάς μεταξύ των υποσταθμών διανομής και των εσωτερικών χώρων του κτιρίου που προτείνεται από το NZFS είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση, για να προστατεύσει τους ενοίκους από τραυματισμό ή ασθένεια σε περίπτωση πυρκαγιάς μετασχηματιστή σε μια χαρακτηριστική πολυκατοικία της Νέας Ζηλανδίας. Οι ακόλουθες δηλώσεις εργασίας διατυπώθηκαν για να ολοκληρώσουν αυτόν τον στόχο:

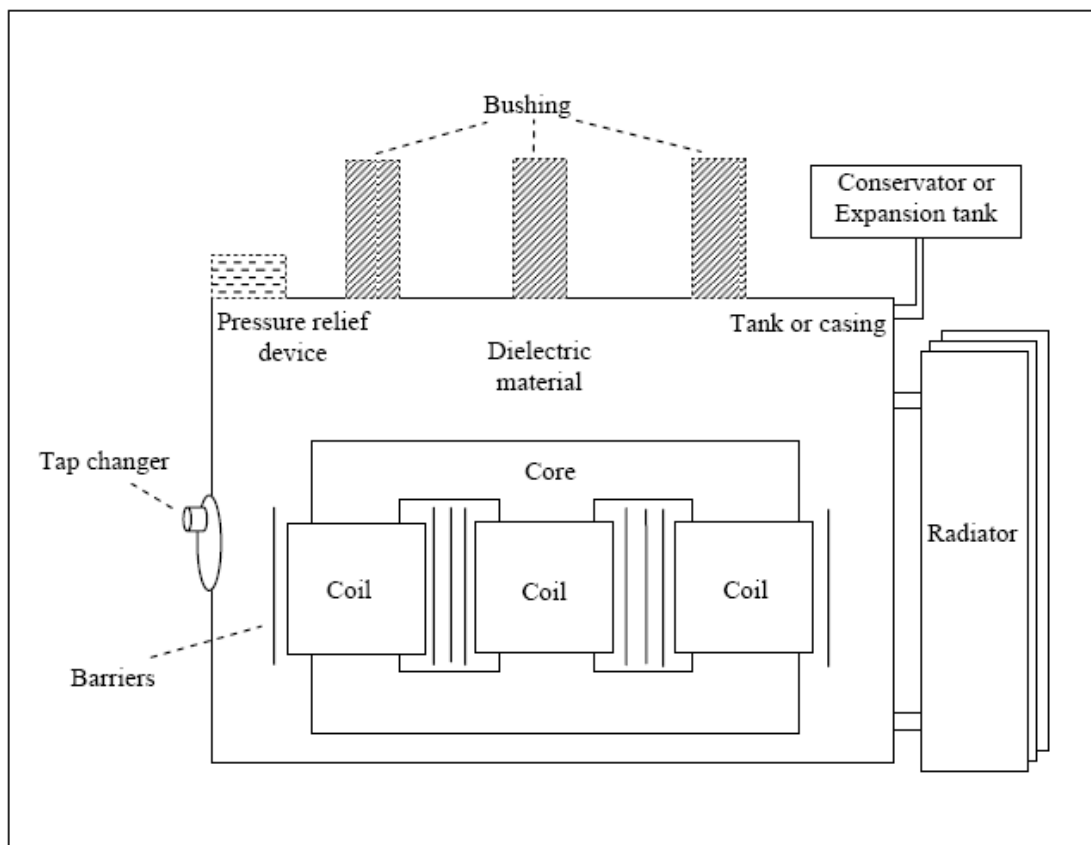
- Εξέταση και σύνοψη των εθνικών και διεθνών προτύπων κανονισμού και των μη κανονιστικών οδηγιών για τη σχεδίαση πυρασφάλειας των υποσταθμών διανομής
- Μελέτη της θεμελιώδους θεωρίας των μετασχηματιστών, καθώς και των συστημάτων προστασίας βλάβης μετασχηματιστών, οι διηλεκτρικοί τομείς, κ.λπ.
- Εξέταση και σύνοψη των χαρακτηριστικών ιστορικών γεγονότων και στοιχείων για τις πυρκαγιές μετασχηματιστών στους υποσταθμούς διανομής
- Εξέταση και σύνοψη της αξιοπιστίας των ενεργών συστημάτων πυροπροστασίας, όπως τα συστήματα ψεκαστήρων και τα συστήματα ανίχνευσης καπνού
- Αναλύσεις και εκτιμήσεις των κινδύνων πυρκαγιάς μετασχηματιστών σε διαφορετικά σενάρια χρησιμοποιώντας ποσοτική ανάλυση κινδύνου
- Αναλύσεις και εκτιμήσεις οικονομικού οφέλους των εναλλακτικών σχεδίων πυρασφάλειας
- Πρόταση των κατάλληλων σχεδίων πυρασφάλειας των υποσταθμών διανομής σε ένα χαρακτηριστικό πολύωρο κτίριο αστικό και εμπορικό πολλαπλής χρήσης της Νέας Ζηλανδίας

3.7.3 Κύριες συνιστώσες μετασχηματιστών

Οι κύριες συνιστώσες ενός μετασχηματιστή είναι τα πηνία (ελάσματα), ο πυρήνας, το κιβώτιο ή κέλυφος, το ψυγείο και οι μονωτήρες, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.2. γενικά, τα πηνία του μετασχηματιστή φτιάχνονται από χαλκό, διότι έχει χαμηλότερη αντίσταση και είναι αποδοτικότερο σε σύγκριση με άλλα μέταλλα. Κάθε περιέλιξη (πηνίο) είναι τυλιγμένη μέσα σε μονωτικό υλικό, όπως χαρτί. Το πρωτεύον τύλιγμα είναι συνήθως τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και το δευτερεύον είναι τότε τυλιγμένο πάνω από το πρωτεύον τύλιγμα. Ανάμεσα σε κάθε στρώμα από τα τυλίγματα, υπάρχει ένα ακόμη στρώμα υλικού μόνωσης, για να παρέχει έξτρα μόνωση ανάμεσα στα τυλίγματα.

Οι κύριες συνιστώσες ενός μετασχηματιστή περιγράφονται εν συντομία παρακάτω:

- 1) Ο πυρήνας είναι ένα σιδηρομαγνητικό υλικό (συνήθως μαλακός σίδηρος ή αντικολλητά φύλλα χάλυβα), που παρέχει μία διαδρομή υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας από το πρωτεύον κύκλωμα στο δευτερεύον.
- 2) Τα τυλίγματα επιτρέπουν να αναπτυχθεί τάση στο δευτερεύον από την εναλλασσόμενη τάση του πρωτεύοντος. Η αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο του πυρήνα του μετασχηματιστή, που προκλήθηκε από την αρχική εναλλασσόμενη τάση του πρωτεύοντος, προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο και ως συνέπεια προκαλεί τάση στο δευτερεύον τύλιγμα.
- 3) Το κιβώτιο ή κέλυφος, το οποίο είναι συνήθως μία ενισχυμένη ορθογώνια κατασκευή, περιέχει το διηλεκτρικό υλικό, τον πυρήνα και τα τυλίγματα.
- 4) Το διηλεκτρικό υλικό είναι μία ουσία, η οποία είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικά τα ηλεκτροστατικά πεδία. Μπορεί να είναι υγρά έλαια, ξηρά στερεά ή αέρια.
- 5) Το κιβώτιο διαστολής ή συντήρησης, που περιέχει ξηρό αέρα ή ξηρό αδρανές αέριο, διατηρείται σε επίπεδο υψηλότερο από το επίπεδο του ρευστού.
- 6) Οι μονωτήρες είναι μία μονωτική δομή, η οποία παρέχει ένα μονοπάτι αγωγής διαμέσου του κέντρου της, της οποίας η κυριότερη λειτουργία είναι να απομονώνει την είσοδο ενός ενεργοποιημένου μονωτήρα στο κιβώτιο.
- 7) Pressboard barriers, ανάμεσα στα τυλίγματα και ανάμεσα στα τυλίγματα και τον πυρήνα, εγκαθίστανται ώστε να αυξηθεί η διηλεκτρική ικανότητα του μετασχηματιστή.
- 8) Το ΣΑΤΥΦ είναι ένα σημείο σύνδεσης κατά μήκος του τυλίγματος του μετασχηματιστή, που επιτρέπει να επιλεγθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός ελασμάτων, ώστε να ρυθμίζεται η τάση.
- 9) Το ψυγείο παρέχει ένα μονοπάτι μεταφοράς θερμότητας, ώστε να εκλυθεί η εσωτερική θερμότητα που δημιουργήθηκε στο μετασχηματιστή.
- 10) Η ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης χρησιμοποιείται για να προστατεύει το κιβώτιο έναντι υπέρμετρης πίεσης που αναπτύσσεται μέσα στο κιβώτιο του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.7.3-1: Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού μετασχηματιστή

3.7.4 Τύποι μετασχηματιστών και μονωτικά

Οι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι τόσο για εσωτερικές όσο και για εξωτερικές εφαρμογές. Ανάλογα με τις αρχές, συχνά κατατάσσονται με βάση την διαβάθμιση της ισχύος τους ή με βάση το ψυκτικό τους μέσο (διηλεκτρικό υλικό).

Το διηλεκτρικό υλικό είναι ένας κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Ο σκοπός της χρήσης διηλεκτρικού υλικού είναι να απομονώσει τη ροή ρεύματος ανάμεσα στα σύρματα ή τα μέταλλα, εμποδίζοντας τη μη ηθελημένη μετάδοση ηλεκτρισμού. Σε αυτήν την έρευνα, έχει προσδιοριστεί ένας μετασχηματιστής 750kW για την αξιολόγηση. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι μετασχηματιστών, σε σχέση με το διηλεκτρικό τους υλικό:

- Εύφλεκτου υγρού (όπως ορυκτού ελαίου)
- Λιγότερο εύφλεκτου υγρού (σημείο ανάφλεξης > 300°C, όπως έλαιο σιλικόνης και φυτικό έλαιο)
- Μη εύφλεκτα υγρά (όπως Askarels, που είναι η γενική ονομασία για τους χλωριωμένους υδρογονάνθρακες)
- Μονωτικά στερεά και αέρια (όπως ξηρός αέρας)

Ο Josken [Josken, J. and D. Wareham, Seed based oil as an alternative to mineral oil. IEEEExplore, May 2004] δηλώνει ότι το ορυκτό λάδι είναι ένα εύφλεκτο υλικό και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως ρευστό για ηλεκτρική μόνωση και για

μεταφορά θερμότητας σε ηλεκτρικό εξοπλισμό για περισσότερο από 100 χρόνια. Η απήχηση του ορυκτού ελαίου οφείλεται στη διαθεσιμότητα και στο σχετικά μικρό κόστος του, όπως επίσης και στο ότι είναι ένα θαυμάσιο διηλεκτρικό και ψυκτικό μέσο. Ωστόσο, ο Oommen [Oommen, T.V., Vegetable oils for liquid-filled transformers. IEEEExplore, Jan/Feb 2002. Vol. 18(1): p. 6-11] βρήκε ότι το ορυκτό έλαιο έχει ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά, όπως χαμηλό σημείο ανάφλεξης (110°C έως 185°C), περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προκαλεί υποβάθμιση της μόνωσης του χαρτιού. Ως εκ τούτου, πολλοί άλλοι τύποι διηλεκτρικών υλικών έχουν αναπτυχθεί ώστε να αντικαταστήσουν τα ορυκτά έλαια.

Οι Hallerberg [Hallerberg, D.A., Less-flammable liquids used in transformers. IEEE Xplore, Jan/Feb 1999. Vol. 5(1): p. 50-55] και Mcshane [Mcshane, C.P., Vegetable-oil-based dielectric coolants. IEEEExplore, May/Jun 2002 Vol. 8(3): p. 34 - 41] δηλώνουν ότι κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920, μία οικογένεια υγρών, τα αποκαλούμενα Askarels, αναπτύχθηκαν ώστε να δώσουν λύση στο πρόβλημα ανάφλεξης του ορυκτού ελαίου. Ωστόσο, η χρήση τους διακόπηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970, λόγω του γεγονότος ότι η σύνθεση των Askarels συνήθως ήταν από 60% έως 70% πολυχλωριωμένα διφενύλια (PCB), τα οποία θεωρούνται πλέον πολύ τοξικά και είναι προϊόντα επικίνδυνα για το περιβάλλον. Επίσης, η παραγωγή και η εμπορική χρήση των PCB's απαγορεύτηκε επίσημα το 1977, από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – EPA) των Η.Π.Α. Ως αποτέλεσμα, όλοι οι μετασχηματιστές που περιείχαν Askarels, έχουν ξαναγεμιστεί με άλλα διηλεκτρικά υλικά. Ο Bracco [Bracco, R.D., Reducing the risk of death and injuries to firefighters and citizens from electrical substation incidents in San Francisco, ed. San Francisco Fire Department Jan 1996: Emmitsburg, MD] σημειώνει ότι κάποιοι μετασχηματιστές μπορεί να εξακολουθούν να περιέχουν PCS's σε διάφορες συγκεντρώσεις, συνήθως χαμηλότερες των 10 μερών του εκατομμυρίου (ppm) και, ως εκ τούτου, αυτές οι μονάδες καλούνται συχνά μετασχηματιστές μόνωσης Askarel. Μερικά τυπικά εμπορικά ονόματα για Askarel είναι τα ακόλουθα:

Asbestol	Chlorextol	Eucarel	Pyralene
Aceclor	Chlorophon	Hylvol	Pyroclor
Apirolio	Diactor	Inerteen	Saf-T-Kuhl
Aroclor	Dycanol	Kanechlor	Soviol/Sovol/Solvol
Bakola 131	Elemex	No-flamor	Ugilect

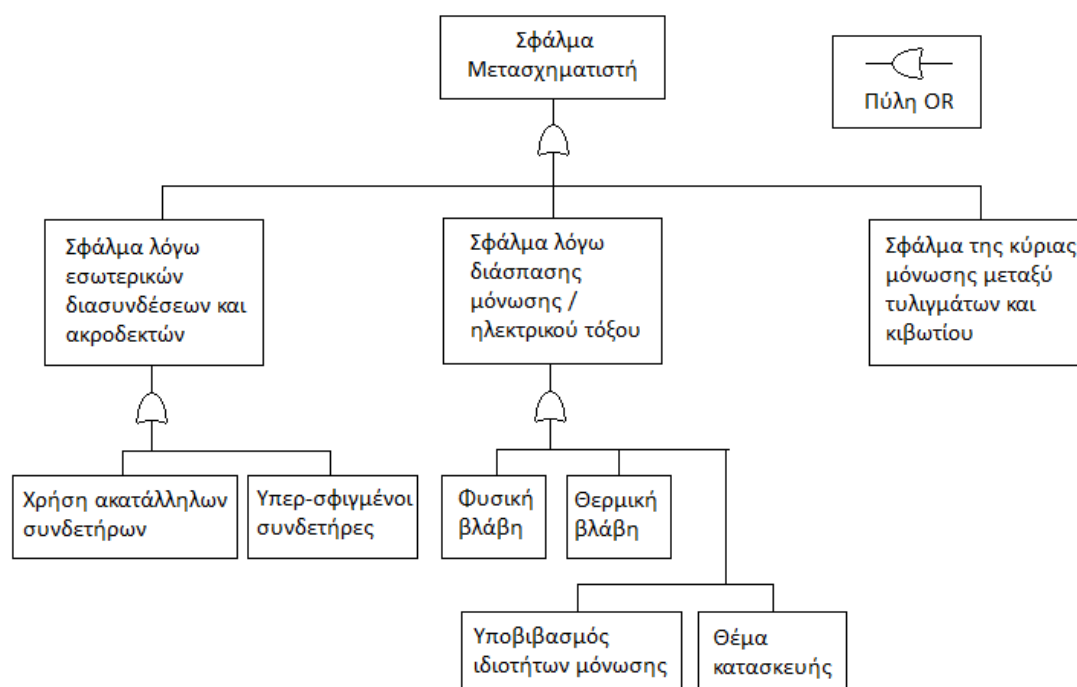
Από τότε που απαγορεύτηκε η χρήση των Askarels, αναπτύχθηκαν άλλα υγρά υψηλού σημείου ανάφλεξης (γνωστά ως λιγότερο εύφλεκτα υλικά) ως αντικατάσταση, όπως η πολυδιμεθυλοσιλικόνη (polydimethylsiloxane – PDMS ή έλαια σιλικόνης), οι πολυαλφαολεφίνες (πολυαλφααλκένια, polyalphaolefins – PAO), οι υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους (high molecular weight hydrocarbon – HMWH), τα φυτικά έλαια κλπ. Αυτά τα διηλεκτρικά ρευστά έχουν σχηματιστεί για να αντέχουν αρκετά μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικών τόξων και γενικά έχουν ένα υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, σε σχέση με τα ορυκτά έλαια. Τα λιγότερο εύφλεκτα υγρά, πρέπει να έχουν ένα ελάχιστο σημείο ανάφλεξης των 300°C.

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι μετασχηματιστές στους οποίους ο πυρήνας και τα τυλίγματα δεν είναι βυθισμένα μέσα σε μονωτικό υγρό, αλλά είναι

βυθισμένα σε αδρανές αέριο ή στερεό. Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι συνήθως μεγαλύτεροι και περισσότερο θερμοί σε σχέση με εκείνους που είναι γεμισμένοι με υγρό, για την ίδια ικανότητα ισχύος. Λόγω κόστους, οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου χρησιμοποιούνται συχνότερα σε υποσταθμούς διανομής, παρά σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς ή τερματικούς σταθμούς. Στους περισσότερους μετασχηματιστές μονωμένους με αέριο, το SF₆ ή ξηρός αέρας χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο, καθώς έχει εξαιρετική διηλεκτρική ικανότητα, χημική σταθερότητα, θερμική σταθερότητα και δεν είναι αναφλέξιμο.

3.7.5 Ανάλυση σφαλμάτων μετασχηματιστή

Παρακάτω, στο σχήμα 3.7.5-1, φαίνεται το δέντρο σφαλμάτων του μετασχηματιστή:



Σχήμα 3.7.5-1: Δέντρο σφαλμάτων για τα σφάλματα του μετασχηματιστή

3.7.6 Ηλεκτρική Προστασία

Οι μετασχηματιστές είναι αξιόπιστες συσκευές, οι οποίες έχουν χαμηλό ποσοστό ηλεκτρικών σφαλμάτων. Ο Moss [Moss, T.R., The reliability data handbook. 2005, London: Professional Engineering xix, 287] σημειώνει ότι ο ρυθμός σφαλμάτων για μετασχηματιστές διανομής είναι από 0,02 έως 16 σφάλματα για κάθε 10⁶ ώρες λειτουργίας, κάτι το οποίο σημαίνει περίπου 180x10⁻⁶ έως 140x10⁻³ σφάλματα το χρόνο. Ωστόσο, τα σφάλματα μετασχηματιστών θεωρούνται ως γεγονότα χαμηλής συχνότητας και αυξημένων συνεπειών, καθώς η έκρηξη και η πυρκαγιά μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές βλάβες στην ιδιοκτησία και έναν υψηλό αριθμό θυμάτων. Ανάλογα με το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας και τους

οικονομικούς παράγοντες, το επίπεδο της προστασίας μετασχηματιστή μπορεί να ποικίλει.

Οι γενικές ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την προστασία έναντι σφαλμάτων των μετασχηματιστών απαριθμούνται ακολούθως:

- Διακόπτης κυκλώματος ή ασφάλειες: παρέχουν προστασία τόσο για εσωτερικά, όσο για εξωτερικά σφάλματα και περιορίζουν το επίπεδο ρεύματος σφάλματος
- Θερμική συσκευή (θερμικό ρελαί): καταγράφει τη θερμοκρασία του υγρού (τυλίγματα) και ενεργοποιείται όταν αυτή ξεπεράσει μία προκαθορισμένη τιμή
- Ρελαί υπέρεντασης: ενεργοποιείται όταν υπάρχει σφάλμα μεταξύ φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης
- Μετρητής επιπέδου υγρού: μετράει το επίπεδο του μονωτικού υγρού στο κιβώτιο
- Διαφορικό ρελαί: λειτουργεί όταν η διαφορά μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος είναι πάνω από μία προκαθορισμένη τιμή
- Αλεξικέραυνα: αποτρέπουν τις υψηλούς τάσης διακυμάνσεις στο σύστημα
- Ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης: μειώνει την υπέρμετρη πίεση που δημιουργείται από τα ηλεκτρικά τόξα
- Ρελαί ξαφνικής πίεσης: ενεργοποιείται όταν ανιχνευτεί συσσώρευση πίεσης στο κιβώτιο
- Ρελαί Buchholz (ενεργοποίηση από αέριο ή έλαιο): ενεργοποιείται όταν ανιχνευτεί συσσώρευση αερίου στο κιβώτιο

3.7.7 Συστήματα πυροπροστασίας

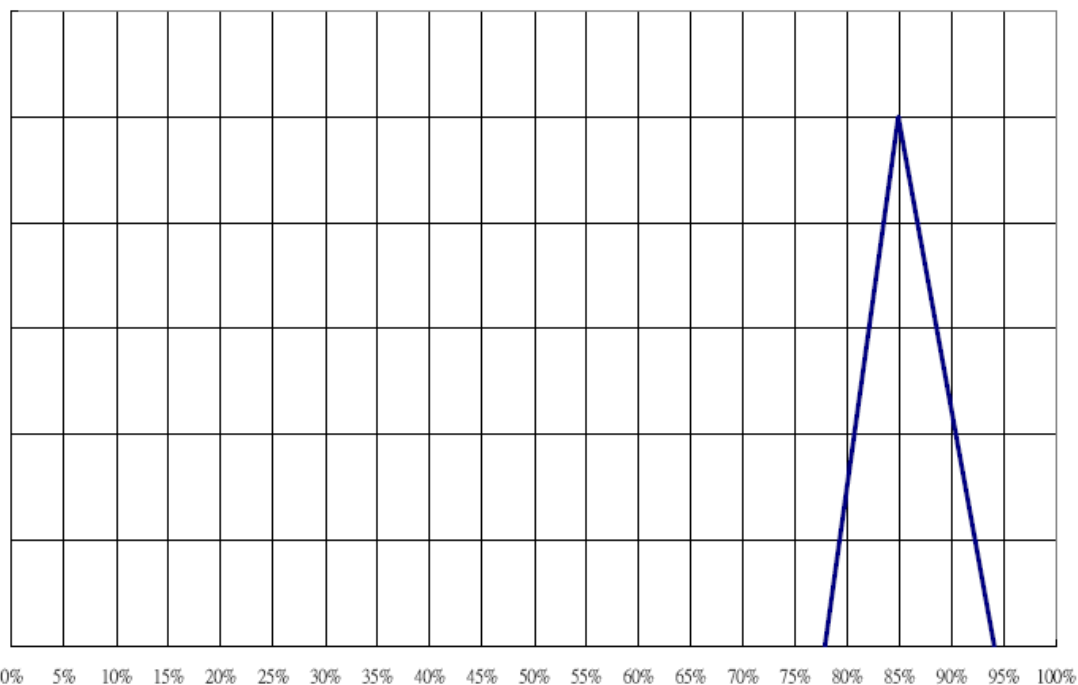
Συχνά, η αξιοπιστία των συστημάτων πυροπροστασίας μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο τύπους, την αξιοπιστία λειτουργικότητας και την αξιοπιστία απόδοσης. Η αξιοπιστία λειτουργικότητας είναι μία εκτίμηση της πιθανότητας το σύστημα να μπορέσει να λειτουργήσει σε ένα περιστατικό πυρκαγιάς. Αυτή η αξιοπιστία μπορεί να βελτιωθεί με ένα καλό πρόγραμμα συντήρησης. Η αξιοπιστία απόδοσης είναι μία εκτίμηση της επάρκειας του συστήματος, μόλις αυτό λειτουργήσει. Τα νεότερα συστήματα πυροπροστασίας είναι πιο πιθανό να είναι περισσότερο αξιόπιστα και πιο αποτελεσματικά, σε σχέση με εκείνα που συντηρούνται χρησιμοποιώντας παλαιά πρότυπα και κώδικες.

3.7.8 Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Περισσότερα από τα μισά πρότυπα και πλαίσια λειτουργίας, προτείνουν συστήματα ανίχνευσης καπνού, στη θέση των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας.

Η αξιοπιστία του συστήματος ανίχνευσης καπνού, εκφράζεται ως η πιθανότητα να ενεργοποιηθεί ο ανιχνευτής καπνού στην περίπτωση μιας

πυρκαγιάς. Εφόσον δεν βρέθηκαν δεδομένα σχετικά με την αξιοπιστία του συστήματος ανίχνευσης καπνού για υποσταθμούς διανομής, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία που βρέθηκαν για γενικά κτίρια. Από αυτά τα δεδομένα, προκύπτει αξιοπιστία από 77,8% έως 94%, με μέση τιμή 84,8%. Ο συντάκτης υποθέτει τριγωνική κατανομή.



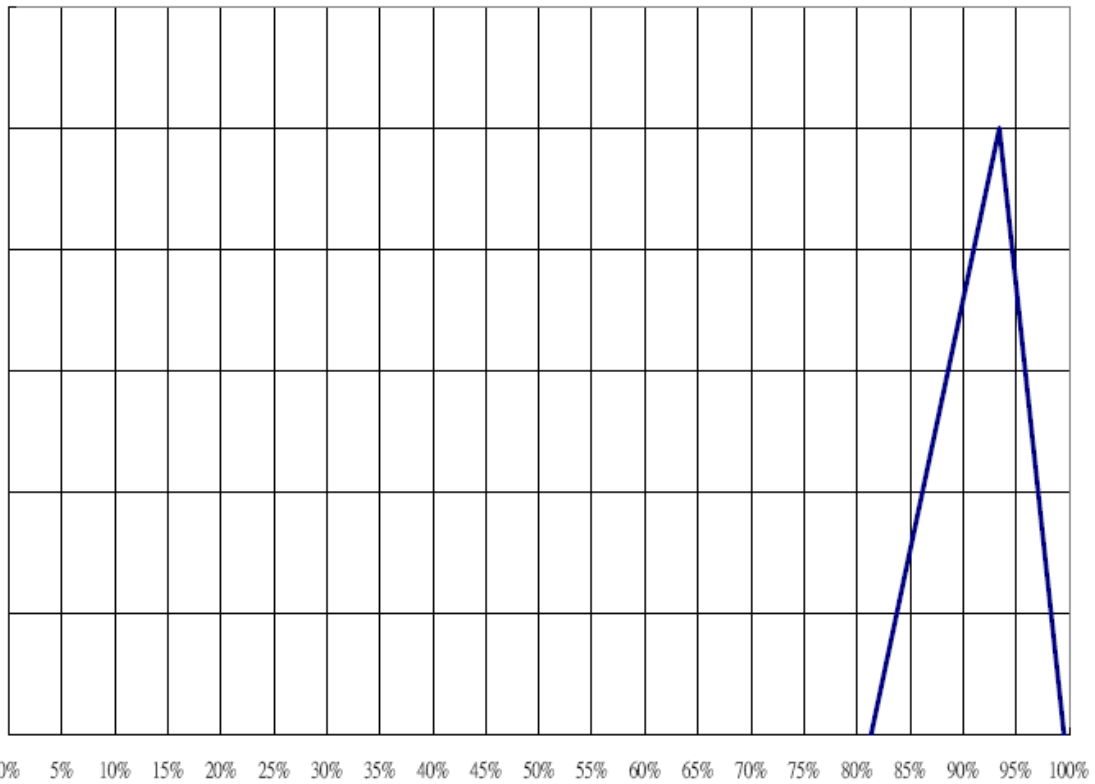
Σχήμα 3.7.8-1: Τριγωνική κατανομή, αξιοπιστία συστήματος ανίχνευσης καπνού

3.7.9 Αυτόματα συστήματα καταστολής

Σύμφωνα με τον Thomas [Thomas, I.R., Effectiveness of Fire Safety Components and Systems. Journal of Fire Protection Engineering May 2002. Vol. 12: p. 63 - 76], η απόδοση του αυτόματου συστήματος καταστολής πυρκαγιάς με ψεκαστήρες (sprinklers), μπορεί να προσδιοριστεί σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Η πυρκαγιά είναι πολύ μικρή για να ενεργοποιήσει το σύστημα ψεκαστήρων
2. Το σύστημα ψεκαστήρων έπρεπε να ενεργοποιηθεί, αλλά δεν ενεργοποιήθηκε
3. Το σύστημα ψεκαστήρων ενεργοποιήθηκε, έλεγξε την πυρκαγιά, αλλά δεν την εξάλειψε
4. Το σύστημα ψεκαστήρων εξάλειψε την πυρκαγιά

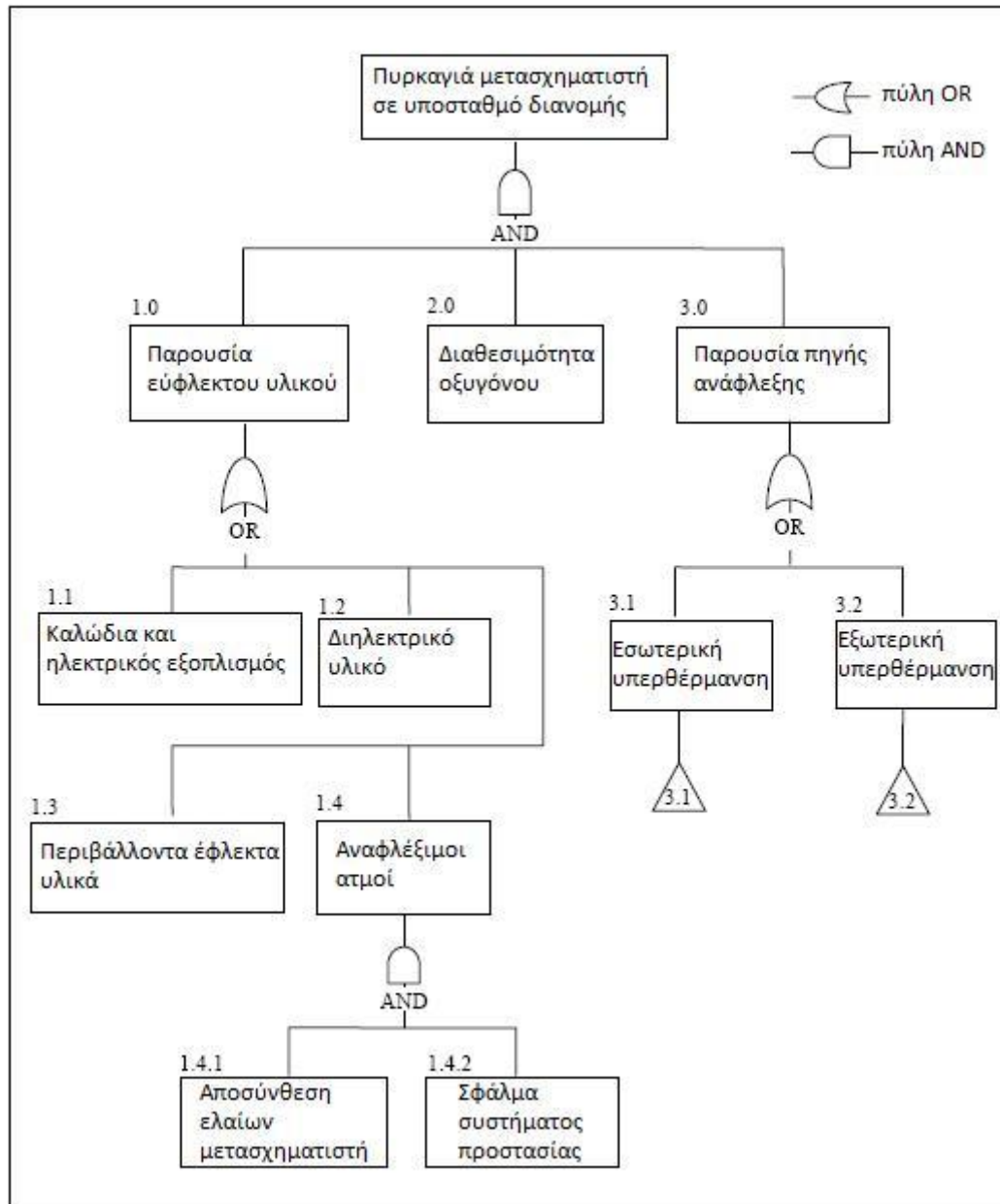
Από τα δεδομένα αξιοπιστίας που παραθέτει ο συντάκτης, προκύπτει αξιοπιστία από 81,3% έως 99,5%, με μέση τιμή 93,4%, τριγωνικής κατανομής.



Σχήμα 3.7.9-1: Τριγωνική κατανομή, αξιοπιστία συστήματος sprinklers

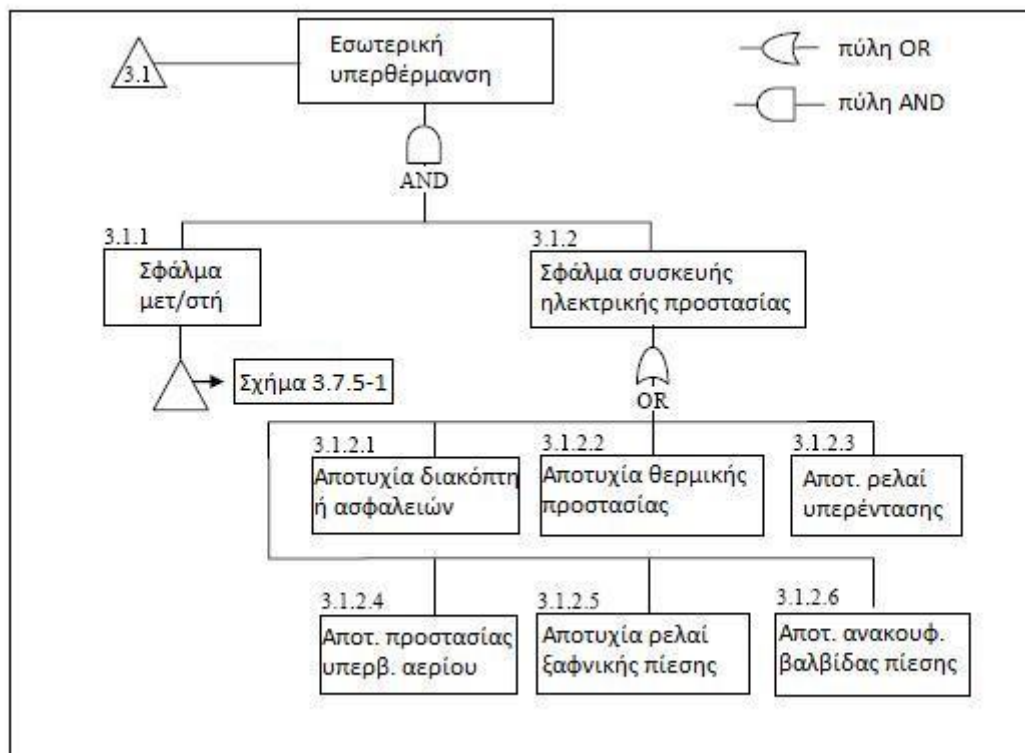
3.7.10 Ανάλυση σφάλματος για την πυρκαγιά μετασχηματιστή

Στο σχήμα 3.7.10-1, παρακάτω, δίνεται το λογικό διάγραμμα για την ανάλυση σφάλματος για την πυρκαγιά μετασχηματιστή:

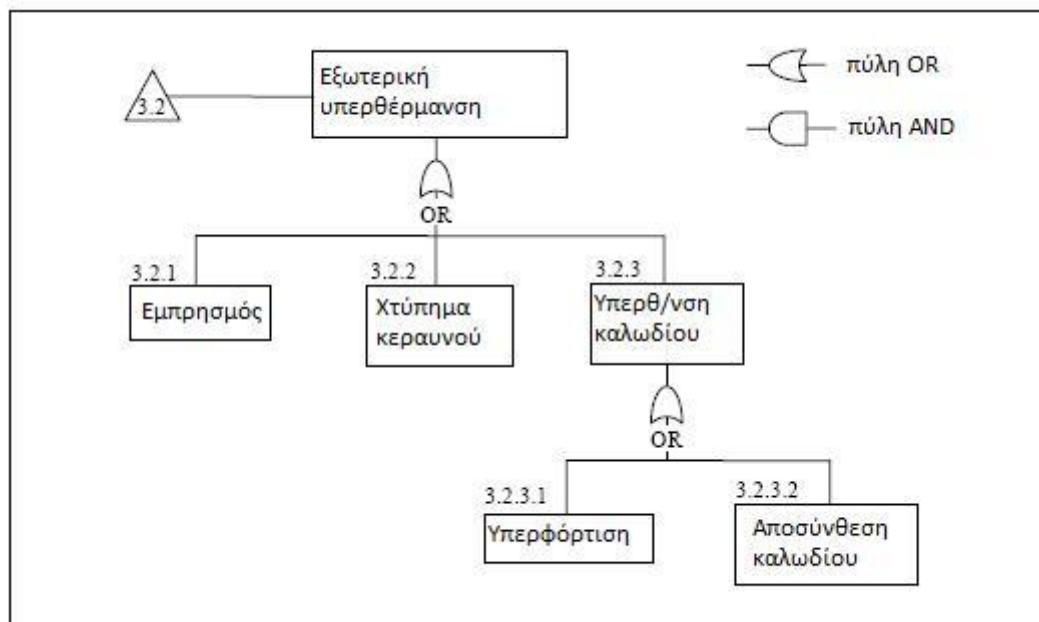


Σχήμα 3.7.10-1: Ανάλυση σφάλματος για πυρκαγιά μετασχηματιστή

Στα σχήματα 3.7.10-2 και 3.7.10-3, παρακάτω, φαίνονται τα λογικά διαγράμματα για την ανάλυση σφάλματος για εσωτερική και εξωτερική σφάλματος, αντίστοιχα:



Σχήμα 3.7.10-2: Ανάλυση σφάλματος για εσωτερική υπερθέρμανση



Σχήμα 3.7.10-3: Ανάλυση σφάλματος για εξωτερική υπερθέρμανση

3.7.11 Ανάλυση σεναρίων

Προσδιορίστηκαν για αυτήν την έρευνα 14 σενάρια με διαφορετικούς σχεδιασμούς πυροπροστασίας και τύπους μετασχηματιστών, για έναν υποσταθμό διανομής σε ένα πολυώροφο κτίριο. Για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε έναν υποσταθμό διανομής με διαφορετικά συστήματα πυροπροστασίας, χρησιμοποιείται στα πρώτα 10 σενάρια ο ίδιος τύπος μετασχηματιστή – εύφλεκτου υγρού (ορυκτού ελαίου) μονωμένος μετασχηματιστής. Γενικά, οι διαφορές μεταξύ αυτών των σεναρίων είναι η ανάμειξη συστημάτων sprinkler και η χρήση κατασκευών διαφορετικής ικανότητας αντίστασης στην πυρκαγιά. Πιο απλά, θεωρούνται συστήματα ψεκαστήρων είτε εγκατεστημένα, είτε όχι, μέσα στην αίθουσα. Θεωρούνται, επίσης, πέντε επίπεδα κατασκευών διαφορετικής ικανότητας αντίστασης στην πυρκαγιά, τα οποία είναι 30 λεπτά πυραντίσταση, 1 ώρα πυραντίσταση, 2 ώρες πυραντίσταση, 3 ώρες πυραντίσταση και 4 ώρες πυραντίσταση.

Από εκεί και πέρα, δύο συγκεκριμένα σχέδια πυροπροστασίας (για παράδειγμα, εκείνο με 3 ώρες πυραντίσταση χωρίς sprinkler και εκείνο με 1 ώρα πυραντίσταση με sprinkler) επιλέγονται ως βάση για την ανάλυση των τύπων μετασχηματιστών. Στα σενάρια 11 έως 14, δύο τύποι μετασχηματιστών με χαμηλό κίνδυνο πυρκαγιάς, ένας μονωμένος μετασχηματιστής λιγότερου εύφλεκτου υγρού (έλαιο σιλικόνης) και ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου (ξηρός αέρας), χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τον μετασχηματιστή εύφλεκτου υγρού (ορυκτού ελαίου).

Σημειώνεται ότι σε όλα τα σενάρια θεωρούνται ανιχνευτές καπνού, συστήματα συναγερμού και υπηρεσίες πυρόσβεσης.

Τα σενάρια αυτά καταγράφονται στον πίνακα 3.7.11-1, που φαίνεται παρακάτω.

Σενάριο	Τύπος μετασηματιστή	Σύστημα ανίχνευσης καπνού	Σύστημα Sprinkler	Υπηρεσίες Πυρόσβεσης	Πυραντίσταση κατασκευής
1	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	30 λεπτά
2	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	1 ώρα
3	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	2 ώρες
4	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	3 ώρες
5	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	4 ώρες
6	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	30 λεπτά
7	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	1 ώρα
8	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	2 ώρες
9	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	3 ώρες
10	Υγρού τύπου (ορυκτού ελαίου)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	4 ώρες
4α	Υγρού τύπου (έλαιο σιλικόνης)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	3 ώρες
4β	Ξηρού τύπου (ξηρός αέρας)	Παρέχεται	Δεν παρέχεται	Παρέχονται	3 ώρες
7α	Υγρού τύπου (έλαιο σιλικόνης)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	1 ώρα
7β	Ξηρού τύπου (ξηρός αέρας)	Παρέχεται	Παρέχεται	Παρέχονται	1 ώρα

Πίνακας 3.7.11-1: σενάρια με διαφορετικούς σχεδιασμούς πυροπροστασίας και τύπους μετασηματιστών, για έναν υποσταθμό διανομής σε ένα πολυώροφο κτίριο

3.7.12 Συμπεράσματα κατόπιν προσομοίωσης και ανάλυσης στατιστικών δεδομένων της δημοσίευσης

Κατόπιν της προσομοίωσης και της ανάλυσης των στατιστικών δεδομένων, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για έναν υποσταθμό διανομής που περιέχει έναν μετασχηματιστή εύφλεκτου υγρού, χωρίς σύστημα sprinkler εγκατεστημένο, η συνιστώμενη κατασκευή πυραντίστασης ποικίλει μεταξύ 1 ώρας και 4 ωρών. Με εγκατεστημένα sprinklers, η κατασκευή μπορεί να υποβιβαστεί στις 2 ώρες πυραντίστασης. Για μετασχηματιστές λιγότερο εύφλεκτου υγρού που εγκαθίστανται σε υποσταθμούς διανομής, προτείνεται κατασκευή πυραντίστασης 1 ώρας ή 3 ωρών, εάν δεν υπάρχουν εγκατεστημένα sprinklers. Εάν υπάρχουν εγκατεστημένα sprinklers, δεν απαιτείται κατασκευή πυραντίστασης. Για ξηρού τύπου μετασχηματιστή, δεν απαιτείται κατασκευή πυραντίστασης, αφού δεν περιέχει υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς υλικά.
- Μελετήθηκαν η αξιοπιστία των μετασχηματιστών και η αξιοπιστία των συστημάτων πυροπροστασίας. Τυπικοί ρυθμοί σφαλμάτων για μετασχηματιστές βρέθηκαν να κυμαίνονται από $0,2 \times 10^{-3}$ έως 140×10^{-3} σφάλματα ανά χρόνο. Η αξιοπιστία των συστημάτων ανίχνευσης καπνού και των sprinklers, βρέθηκε να είναι από 77,8% έως 94% και από 81,3% έως 99,5%, αντίστοιχα.
- Υπήρξε κάποια αβεβαιότητα σε αυτήν την έρευνα, λόγω έλλειψης πληροφοριών και δεδομένων για τα συστήματα πυροπροστασίας σε υποσταθμούς διανομής.
- Εκτελώντας ανάλυση δέντρου γεγονότων για κάθε ένα από τα 14 σενάρια, βρέθηκε ότι το σενάριο 1 έχει το μεγαλύτερο κίνδυνο και το μεγαλύτερο κόστος για κάθε περιστατικό πυρκαγιάς σε υποσταθμό. Καθώς αυξάνουμε τα μέτρα προστασίας (σενάριο 1 προς σενάριο 10), μειώνεται ο αντίστοιχος κίνδυνος και το κόστος πυρκαγιάς, φτάνοντας, έτσι, στο σενάριο 10, το οποίο έχει το χαμηλότερο κίνδυνο και το χαμηλότερο κόστος για κάθε περιστατικό πυρκαγιάς σε υποσταθμό.
- Από την ανάλυση κόστους – οφέλους, βρέθηκε ότι η κατασκευή που έχει πυραντίσταση 4 ωρών χωρίς sprinklers, όπως προτείνεται από την Πυροσβεστική Υπηρεσία Νέας Ζηλανδίας, δεν θεωρείται η οικονομικά καλύτερη επιλογή. Από την ανάλυση αυτή, βρέθηκε ότι, τα σενάρια με εγκατεστημένο σύστημα sprinklers (σενάριο 6 έως 10) έχουν γενικά μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη, σε σύγκριση με αυτά χωρίς σύστημα sprinklers (σενάρια 2 έως 5). Από τα 9 αυτά σενάρια, το πιο αποδοτικό οικονομικά σενάριο ήταν το σενάριο 6 (με sprinklers, κατασκευή 30 λεπτών πυραντίστασης). Επιπλέον, σε ένα κτίριο χωρίς εγκατεστημένα sprinklers, το καλύτερο οικονομικά σενάριο ήταν το σενάριο 4 (κατασκευή 3 ωρών πυραντίστασης). Να σημειωθεί, ότι η ανάλυση κόστους – οφέλους, σε αυτήν την έρευνα, δεν λαμβάνει υπόψη τις καταστροφές της ιδιοκτησίας, τη διακοπή της επιχειρηματικής δραστηριότητας ή τις

περιβαλλοντικές επιπτώσεις, που προκαλούνται από τις πυρκαγιές μετασηματιστών και τις εξαλείψεις των πυρκαγιών.

Σαν συμπέρασμα από αυτήν την έρευνα, γίνονται οι ακόλουθες προτάσεις:

- Όταν δεν παρέχεται σύστημα sprinklers, προτείνεται η χρήση κατασκευής 4 ωρών πυραντίστασης μεταξύ του υποσταθμού διανομής και των εσωτερικών χώρων του κτιρίου, ως η πιο αποδοτική οικονομικά εναλλακτική, για την ταυτόχρονα καλύτερη προστασία της ζωής των κατοίκων του κτιρίου.
- Από την άποψη της προστασίας της ζωής, οι υποσταθμοί διανομής σε πολύροφα κτίρια συνίσταται να προστατεύονται από συστήματα sprinklers και ανιχνευτές καπνού. Εάν παρέχεται σύστημα sprinklers, η κατασκευή διαχωρισμού του υποσταθμού από το υπόλοιπο κτίριο μπορεί να έχει πυραντίσταση μειωμένη στα 30 λεπτά. Εάν δεν παρέχεται σύστημα sprinklers, τότε η αποδοτικότερη οικονομικά λύση είναι εκείνη με κατασκευή πυραντίστασης 3 ωρών.
- Επιπρόσθετα, η αντικατάσταση του μετασηματιστή εύφλεκτου υγρού με έναν λιγότερο εύφλεκτου ή ξηρού τύπου, θα μπορούσε να αποτελέσει μία εναλλακτική οικονομική πρόταση.

4. Συμπεράσματα επί της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και σχόλια επί των εργασιών

Στην έρευνα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας, βρέθηκαν αρκετές εργασίες πάνω στο αντικείμενο της πυροπροστασίας μετασχηματιστών.

Στην πρώτη, έγινε λόγος για την πυροπροστασία κατά τη συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις εντολών, επικοινωνιών, υπολογιστών, πληροφοριών, παρακολούθησης και αναγνώρισης. Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν οι τύποι πυρανιχνευτών, οι οποίοι διακρίνονται σε ανιχνευτές καπνού, θερμότητας και φλόγας, τα συστήματα σηματοδότησης, καθώς και τα συστήματα καταστολής της πυρκαγιάς, με έμφαση στο σύστημα νερού, CO₂, αφρού και φορητών πυροσβεστήρων.

Στη δεύτερη, συζητήθηκαν τα συστήματα πυροπροστασίας μετασχηματιστών και η πυρανίχνευση, κατά το μηχανολογικό σχεδιασμό υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, έγινε λόγος για την πυροπροστασία των μετασχηματιστών, είτε αυτοί είναι υπαίθριοι, είτε εσωτερικοί. Ακόμη, συζητήθηκε η ανίχνευση της πυρκαγιάς, με έμφαση στους ανιχνευτές θερμότητας, τους ανιχνευτές ιονισμού και τους φωτοηλεκτρικούς ανιχνευτές.

Στην τρίτη αναφέρθηκαν τα πυρίμαχα ρευστά για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές, με βάση μια δημοσίευση που έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή έγινε λόγος για τα ρευστά που χρησιμοποιούνταν ως μονωτικά υλικά στους μετασχηματιστές, τα λεγόμενα askarels, τα οποία είναι πυρίμαχα. Κατόπιν, αναφέρθηκαν οι παραδοσιακές εναλλακτικές επιλογές έναντι των askarels, αφού αυτά ωθήθηκαν προς πλήρη αντικατάσταση, λόγω περιβαλλοντικών και άλλων επιπτώσεων. Τέλος, συζητήθηκαν οι νέες εμπορικές εναλλακτικές επιλογές έναντι των askarels, οι οποίες ανοίχθηκαν, εκείνη τη χρονική περίοδο, για την αντικατάστασή τους.

Στην τέταρτη έγινε λόγος για την ανάπτυξη ενός Μαγνητο-Θερμο-Υδροδυναμικού Μοντέλου και το σχεδιασμό ενός συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, Σ.Α.Τ.Υ.Φ. και δοχείου μονωτικού ελαίου. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή έγινε λόγος για το ρόλο των ηλεκτρικών προστασιών και κυρίως για την ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης και το δίσκο διάρρηξης. Κατόπιν, εξηγήθηκαν οι λόγοι αποτυχίας του συστήματος εξάλειψης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες νερού. Στη συνέχεια, έγινε λόγος για την πίεση που αναπτύσσεται λόγω βραχυκυκλωμάτων στο κιβώτιο του μετασχηματιστή, ενώ εξηγήθηκε γιατί δεν υπάρχει όφελος από την χρήση ελαίου σιλικόνης σε σχέση με τα συμβατικά έλαια. Ακολούθως, έγινε αναφορά στην απόδοση του δίσκου διάρρηξης. Τέλος, έγινε περιγραφή του συστήματος πρόληψης έκρηξης και πυρκαγιάς μετασχηματιστή, το οποίο αναπτύχθηκε από τη SERGI.

Στην πέμπτη περιγράφηκε ένα σύστημα πρόληψης και εξάλειψης πυρκαγιάς για μετασχηματιστές ηλεκτροκίνησης 30MVA, 110kV/27kV, που εφαρμόζεται στο προασιακό τμήμα του Mumbai. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή έγινε λόγος για τα μειονεκτήματα της έκρηξης του μετασχηματιστή και της πυρκαγιάς στον

υποσταθμό, ώστε να δειχθεί η αναγκαιότητα ύπαρξης πυροπροστασίας. Κατόπιν, εξηγήθηκαν οι λόγοι για τους οποίους οι μετασχηματιστές εκρήγνυνται, ενώ ακόμη δόθηκαν πληροφορίες για τα όρια της ηλεκτρικής και μηχανικής προστασίας των μετασχηματιστών. Στη συνέχεια έγινε περιγραφή του συστήματος πρόληψης και κατάσβεσης πυρκαγιάς με ψεκαστήρες αζώτου, ενώ έγινε αναφορά για τον τρόπο ελέγχου του και τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με το σύστημα ψεκασμού CO₂ και το σύστημα ψεκασμού νερού.

Στην έκτη έγινε λόγος για την πυροπροστασία μετασχηματιστών ισχύος με ένα σύστημα συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή έγινε λόγος για τα συστήματα πυροπροστασίας που χρησιμοποιούν ψεκαστήρες με νερό, καθώς και ένα σύστημα αφρού απορρόφησης αέρα (air-aspirated foam system). Κατόπιν, εξηγήθηκε η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της ικανότητας καταστολής της πυρκαγιάς του συστήματος συμπιεσμένου αέρα – αφρού. Αναλύθηκαν: η εγκατάσταση του δοκιμαστικού μετασχηματιστή ισχύος, οι διατάξεις ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν, τα δοκιμαστικά καύσιμα, τα συστήματα καταστολής και η διαδικασία της ίδιας της δοκιμής. Στη συνέχεια έγινε αναφορά στα αποτελέσματα των δοκιμών. Τέλος, δόθηκαν τα συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, στην έβδομη, έγινε μία εκτίμηση κινδύνου πυροπροστασίας μετασχηματιστή, με βάση τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, για ένα τυπικό πολυώροφο κτίριο της Νέας Ζηλανδίας. Πιο συγκεκριμένα, έγινε περιγραφή μίας μελέτης, η οποία παρουσιάζει μία Ποσοτική Εκτίμηση Κινδύνου σε μια πυρκαγιά μετασχηματιστή, που ξεκινάει σε έναν υποσταθμό διανομής, σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή με εμπορικά κτίρια πολλαπλών χρήσεων. Αυτή η μελέτη εξέτασε τα χαρακτηριστικά ιστορικών δεδομένων για πυρκαγιές μετασχηματιστών σε υποσταθμούς διανομής, τόσο στα κτίρια της Νέας Ζηλανδίας, όσο και σε αυτά των Η.Π.Α. Η αξιοπιστία των συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας, όπως ανιχνευτές καπνού και πυροσβεστικοί ψεκαστήρες οροφής, μελετήθηκαν σε αυτήν την έρευνα. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων, μία προσέγγιση του κινδύνου πυρκαγιάς καθορίστηκε χρησιμοποιώντας μία ανάλυση δέντρου γεγονότων για ένα σύνολο 14 περιπτώσεων, με διαφορετικούς σχεδιασμούς πυροπροστασίας και διαφορετικούς τύπους μετασχηματιστών για έναν υποσταθμό διανομής, σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή με εμπορικά κτίρια πολλαπλών χρήσεων.

Επιπροσθέτως, σχετικά με τις μεθόδους πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης για εξωτερικούς χώρους, αναφέρουμε ότι προτάθηκε μία ακόμη μέθοδος για την ανίχνευση της πυρκαγιάς [13]. Σύμφωνα με αυτήν, χρησιμοποιείται η τεχνολογία GSM, έτσι ώστε να ενεργοποιείται αυτόματα και από απόσταση το σύστημα καταστολής της πυρκαγιάς και να στέλνονται ασύρματα σήματα, με τις συντεταγμένες της θέσης του μέρους στο οποίο έχει εμφανιστεί η πυρκαγιά, προς το κέντρο επιχειρήσεων, για την όσο το δυνατόν ταχύτερη επέμβαση. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε, ενδεχομένως, να χρησιμοποιηθεί και για την πυροπροστασία του περιβάλλοντος χώρου των μετασχηματιστών.

Τέλος, αναφέρουμε ότι υπάρχουν μέθοδοι πυροπροστασίας του μετασχηματιστή, οι οποίες αφορούν στη χρήση νέων υλικών πυρόσβεσης, όπως είναι η αμπούλα BONPET, η οποία κυκλοφορεί στο εμπόριο [14], [15], [16]. Η

αμπούλα αυτή, περιέχει 600 ml χημικού υγρού σε αεροστεγώς κλεισμένη γυάλινη αμπούλα και περιέχει ουρία, χλωριούχο αμμώνιο, πυριτικό νάτριο, άνυδρο διττανθρακικό νάτριο και αλουνίτη. Η αμπούλα BONPET είναι αποτελεσματική για σβήσιμο πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο και ιδιαίτερα στην αρχή της πυρκαγιάς στις εξής περιπτώσεις: πυρκαγιάς στερεών υλικών, εύφλεκτων υγρών, αλλά και ηλεκτρικού ρεύματος, αφού δεν προκαλεί βραχυκύκλωμα. Λειτουργεί από μόνη της, αυτόματα, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οβίδα για κατάσβεση της φωτιάς. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, δεν υπάρχει κίνδυνος δηλητηρίασης για τον άνθρωπο ή τα ζώα, δεν είναι βλαβερό για το περιβάλλον, ενώ αφού ενεργοποιηθεί η γυάλινη αμπούλα, σπάει και δημιουργούνται θρύψαλα, που είναι ακίνδυνα. Ακόμη, δεν χρειάζεται συντήρηση, παρά μόνον από καιρό σε καιρό πρέπει να ελέγχεται μήπως έχει κάπου χτυπηθεί. Σχετικά με τη διάρκεια ζωής της, δεν σκουριάζει και δεν παρουσιάζει φυσικές αλλαγές σε χρονικό διάστημα 10 ετών. Ακόμη, όσον αφορά στην εγκατάσταση, βιδώνουμε τη βάση της αμπούλας πάνω από πιθανή πηγή φωτιάς και τοποθετούμε πάνω της την αμπούλα. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η αμπούλα BONPET αντιδρά στην υψηλή θερμοκρασία και όταν η θερμοκρασία του υγρού φτάσει τους 90°C, το γυαλί της αμπούλας σπάει. Κατά τη λειτουργία της αμπούλας BONPET, η φωτιά σβήνει και στην επιφάνεια του χυμένου υγρού δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα θειικής ένωσης, που εμποδίζει να επαναληφθεί η ανάφλεξη. Οι χημικές ουσίες, με το που καταβρέχουν τις φλόγες, παράγουν διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο αμέσως ψύχει τις φλόγες και καταπνίγει τη φωτιά.

Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.: Εφαρμογές Κτιριακών – Βιομηχανικών Μελετών και Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1990
- [2] Τεγόπουλος Ι.Α.: Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β' Μόνιμη Κατάσταση, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [3] Αρχηγείο Πυροσβεστικού Σώματος Διεύθυνση Ι Προληπτικής Πυροπροστασίας: Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων (Π.Δ. 71/88)
<http://www.microrisk2001.gr/microkat/Nomothesia/PD71-88.pdf>
- [4] Χρήστος Χατζηγιάννου: Πυροπροστασία, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε. Παράρτημα Θεσσαλονίκης
<http://www.firesecurity.gr/Pdf/Pioprostasia.pdf>
- [5] Κουφάκης Εμ.: Μία προσέγγιση της Διάρκειας Ζωής Εξοπλισμού των Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Παράδειγμα τους Μετασχηματιστές Διανομής, Ε.Μ.Π. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, Δεκέμβριος 2008
- [6] Technical Manual – System Design Features, Headquarters, Department of the Army: Maintenance of Mechanical and Electrical Equipment at Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities, 9 December 2005
- [7] Engineering and Design, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers: Hydroelectric Power Plants Mechanical Design, 30 June 1995
- [8] Henry A. Pearce, Transformer Division Westinghouse Electric Corporation: Fire Resistant Fluids for Industrial Transformers, presented at the 81st Annual Meeting of the National Fire Protection Association on May 18, 1977
- [9] Moumen Darcherif, EPMI Research Director, Philippe Magnier, SERGI President, David Scheurer, SERGI Research Department: Development of a Magneto-Thermo-Hydrodynamic Model and Design of a Transformer, On Load Tap Changer and Bushing Oil Cable Box, Explosion and Fire Prevention, IEEE Mexico Section, Acapulco, 11th to 16th July 1999
- [10] Mr. A K Malhotra, Director (Technical), Mr. Ravi Agarwal, Chief Electrical Engineer Mumbai Rail Vikas Corporation: Fire Prevention and Extinguishing System for 30MVA 110 KV/27 KV Traction transformers on Mumbai Suburban Section, International Seminar on Emerging Technologies & Strategies for Energy Management in Railways
- [11] A. Kim, G. Crampton: Fire protection of power transformers with compressed-air-foam (CAF) system, Proceedings of 7th AOSFST Symposium, Hong Kong, September 2007
- [12] Anthony Kwok-Lung Ng: Risk Assessment of Transformer Fire Protection in a Typical New Zealand High-Rise Building, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007
- [13] S.D. Anagnostatos, A.N. Proios, E.I. Koufakis, A.D. Polykrati, P.D. Bourkas: A System for Outdoor Fire Detection and Suppression, 2009

- [14] <http://www.bonpet.com/>
- [15] <http://www.bonpet.gr/>
- [16] <http://www.lifesolutions.gr/>