



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Θερμική συμπεριφορά εναέριων αγωγών διανομής Μέσης και Χαμηλής τάσης σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες σφάλματος”

“Thermal behavior of overhead distribution power lines (medium and low voltage), under normal operating conditions as well as in case of short-circuits”



Υπεύθυνος Καθηγητής:

Δρ. Μαλατέστας Β. Παντελής

Φοιτητής:

Μαρία Σουλινάρη

Α.Μ.

56

**Αθήνα
Δεκέμβριος 2017**

Copyright © Σουλινάρη Μαρία,2017

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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων» του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Μαλατέστα Παντελή, Καθηγητή του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. του τμήματος Ηλεκτρολογίας, για τις πολύτιμες συμβουλές του. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου κ. Σουλινάρη Γεώργιο, ο οποίος στάθηκε σημαντικός αρωγός στην προσπάθειά μου για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσιτίλο Γεώργιο καθώς και τον κ Κουρέλη Χαράλαμπο για την παροχή τεχνικών στοιχείων αναφορικά με το θέμα τις εργασίας μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	iii
Περίληψη.....	vi
Executive Summary	vii
Πρόλογος.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 “ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”	3
1. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)	3
1.1 Δομή ΣΗΕ.....	3
1.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	6
1.2.1 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Δικτύων Διανομής.....	9
1.2.2 Μέσα προστασίας και ζεύξεως δικτύου διανομής ΜΤ.....	12
1.2.2.1 Διακόπτες ισχύος.....	12
1.2.2.2 Ασφάλειες μέσης τάσης	19
1.2.2.3 Διακόπτες Φορτίου	25
1.2.2.4 Διακόπτες απομόνωσης (ΔΑ) (Sectionalizer)	27
1.2.2.5 Αποζεύκτες.....	29
1.2.2.6 Επιλεκτική συνεργασία	30
1.2.3 Ακτινικό δίκτυο Μ.Τ. με σύνδεση ΑΠΕ (διεσπαρμένη παραγωγή).....	31
1.2.3.1 Πλεονεκτήματα από τη χρήση έξυπνων ΔΑΕ, ΔΑ.....	33
1.2.4 Μέσα προστασίας και ζεύξεως δικτύου διανομής ΧΤ.	34
1.2.4.1 Ασφάλειες τήξης	35
1.2.4.2 Ασφαλειοαποζεύκτες.....	37
1.2.4.3 Αυτόματοι διακόπτες ισχύος	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 “ΕΝΑΕΡΙΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ”	39
2.1. Εναέρια Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης.....	39
2.2 Εναέρια Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης.....	40
2.3 Αγωγοί εναέριων δικτύων	41
2.3.1 Αγωγοί από χαλκό	43
2.3.2 Αγωγοί από αλουμίνιο.....	44
2.3.3 Αγωγοί από κράμα αλουμινίου	45
2.3.4 Αγωγοί από αλουμίνιο με χαλύβδινη ψυχή.....	46
2.3.5 Αγωγοί από γαλβανισμένο χάλυβα	47
2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναερίων αγωγών.....	49
2.4.1 Ωμική και επαγωγική αντίσταση.....	49
2.4.2 Τιμές ωμικής και επαγωγικής αντίστασης εναερίων αγωγών διανομής.....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 “ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ”	55
3.1 Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις εναερίων αγωγών	55
3.1.1 Ικανότητα φόρτισης εναερίων αγωγών	55
3.1.2 Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης αγωγού.....	56
3.1.3 Τιμές μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος φόρτισης αγωγών.....	60
3.1.4 Ικανότητα υπερφόρτισης αγωγών.	62
3.1.5 Δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας).....	66
3.1.5.1 Προσεγγιστικός τύπος της αύξησης της θερμοκρασίας των αγωγών υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 “ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ”	69
4.1 Σφάλματα (Βραχυκυκλώματα) στο εναέριο δίκτυο	69
4.1.1 Παροδικά σφάλματα.....	70
4.1.2 Μόνιμα σφάλματα	70
4.1.3 Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων	72
4.1.3.1 Τριφασικό βραχυκύκλωμα	72
4.1.3.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη φάση Α	72
4.1.3.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα στις φάσεις Β και C	73
4.1.4 Εντοπισμός του σφάλματος.....	75
4.2 Θερμική καταπόνηση αγωγών μέσης τάσης	76
4.2.1 Ανάλυση του ρεύματος βραχυκύκλωσης	76
4.2.2 Αύξηση θερμοκρασίας σε αγωγούς λόγω βραχυκυκλώματος (προσεγγιστική μέθοδος).....	79
4.2.3 Αύξηση θερμοκρασίας σε αγωγούς λόγω βραχυκυκλώματος κατά IEC 865-1	81
4.2.4 Αύξηση της θερμοκρασίας ενός αυτομάτου διακόπτη επαναφοράς στους τρεις κύκλους λειτουργίας του.....	88
4.3 Πειραματικές διερευνήσεις σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	94
4.3.1 Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης[19]	94
4.4 Αντοχή καλωδίων και αγωγών σε βραχυκύκλωμα.....	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 “ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ”	111
5.1 Λειτουργία προστασίας εναερίων δικτύων Μέσης Τάσης.....	112
5.2 Βασικοί κανόνες προστασίας	115
5.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε μία μελέτη προστασίας.....	116
5.3.1 Μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα Η/Ν	116
5.3.2 Ρύθμιση προστασιών ηλεκτρονόμων αναχωρήσεων γραμμών Μ.Τ.	118
5.4 Πρακτικοί κανόνες για τη συνεργασία των μέσων προστασίας που εφαρμόζονται κατά τη διενέργεια μελέτης προστασίας.....	125
5.4.1 Για τους αγωγούς.....	125

5.4.2 Για τη λειτουργία χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου φάσεων του ΔΙ:	125
5.4.3 Για τη στιγμιαία λειτουργία του ηλεκτρονόμου φάσεων του ΔΙ.....	126
5.4.4 Για τη λειτουργία χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου γης του ΔΙ	126
5.4.5 Για τη στιγμιαία λειτουργία του ηλεκτρονόμου γης του ΔΙ.....	127
5.4.6 Για την εγκατάσταση των τηκτών	127
5.4.7 Για τη ρύθμιση αυτόματων επαναφορών ΔΙ και κύκλων στους ΔΑ	131
5.5 Παραδείγματα μελέτης προστασίας σε γραμμές ΜΤ.	132
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	156

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς των εναέριων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (μέσης και χαμηλής τάσης) σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας καθώς και σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος. Αρχικά αναφέρονται οι τύποι και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εναερίων αγωγών του δικτύου διανομής μέσης και χαμηλής τάσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ικανότητα φόρτισης των εναερίων αγωγών διανομής και προσεγγίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, αναφέρονται δύο μέθοδοι υπολογισμού σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος και υπολογίζεται η αύξηση θερμοκρασίας στους τρεις κύκλους λειτουργίας ενός αυτομάτου διακόπτη επαναφοράς. Επιπλέον, περιγράφεται η απαιτούμενη συνθήκη βραχυκύκλωσης, ώστε να τήκεται άμεσα η προτεταγμένη ασφάλεια, σε εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης. Τέλος, γίνεται αναφορά σε θέματα μελέτης προστασίας εναερίου δικτύου διανομής. Παρουσιάζονται παραδείγματα μελέτης προστασίας σε γραμμές Μέσης Τάσης που εκπονήθηκαν με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (μέγιστα και τα ελάχιστα βραχυκυκλώματα, ενδεικτικά διαγράμματα αλληλουχίας της προστασίας).

Λέξεις κλειδιά: Εναέριοι αγωγοί, ικανότητα φόρτισης αγωγών, γραμμές διανομής (Μέση Τάση Χαμηλή Τάση), βραχυκύκλωμα, μέσα προστασίας, διακόπτης ισχύος, διακόπτης αυτόματου επαναφοράς, διάγραμμα αλληλουχίας προστασίας, θερμική καταπόνηση, αύξηση θερμοκρασίας

EXECUTIVE SUMMARY

The main aim of this dissertation is to study and understand thermal behavior of overhead distribution power lines (medium and low voltage), under normal operating conditions as well as in case of short-circuits. At first, distribution overhead power conductors types and technical features are considered. Subsequently, the loading of overhead distribution power conductors loading is presented and temperature rise under normal operating conditions is approached. Furthermore, two calculation methods regarding conductors temperature rise in case of short-circuit are mentioned and temperature rise during duty cycle of a recloser is calculated. Moreover, required condition of neutralization in low voltage lines, is described. Finally, overhead distribution lines protection studying issues are mentioned. Protection studying examples in medium voltage lines are represented with the use of an appropriate software (maximum and minimum faults, indicative selective protection diagrams).

Keywords: Overhead conductors, conductors loading, distribution power lines (medium voltage low voltage), short circuit, protection equipment, circuit breaker, recloser, , selective protection diagram, thermal stress, temperature rise.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενό, τη θερμική συμπεριφορά των εναέριων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (μέσης και χαμηλής τάσης) σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας καθώς και σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καταγράφοντας τις διάφορες κατηγορίες τους ανάλογα με τη θέση την τάση, τη δομή και περιγράφοντας περιληπτικά τα μέσα προστασίας και ζεύξεως που αποτελούν βασικά στοιχεία για την συνέχεια και την ασφάλεια του δικτύου διανομής μέσης και χαμηλής τάσης. Επιπλέον γίνεται σύντομη αναφορά σε περίπτωση σύνδεσης διασπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στους αγωγούς του Εναερίου Δικτύου Διανομής Μέσης και χαμηλής Τάσης και γίνεται σύντομη περιγραφή τεχνικών χαρακτηριστικών των εναερίων αγωγών ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους. Επίσης επισημαίνονται τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά όσο και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εναερίων αγωγών μέσης και χαμηλής τάσης (ωμική και επαγωγική αντίσταση).

Το τρίτο κεφάλαιο στις μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις των δικτύων διανομής σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με σύντομη αναφορά στο θέμα της υπερφόρτισης. Γίνεται επίσης αναφορά στη δοκιμή της «υπερθέρμανσης» των αγωγών καθώς και σε προσεγγιστικό υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στη θερμική συμπεριφορά εναερίων αγωγών διανομής σε συνθήκες σφάλματος. Αρχικά γίνεται μία αναφορά στα είδη σφαλμάτων στο εναέριο δίκτυο καθώς και σε υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό). Αναφορικά με την θερμική καταπόνηση των αγωγών περιγράφεται η αύξηση της θερμοκρασίας σε αγωγούς λόγω βραχυκυκλώματος σύμφωνα με το IEC 865-1, καθώς και μέσω προσεγγιστικής μεθόδου. Επίσης γίνονται υπολογισμοί της αύξησης της θερμοκρασίας σε αυτόματο διακόπτη επαναφοράς κατά τους τρεις κύκλους λειτουργίας του. Επιπρόσθετα περιγράφεται η απαιτούμενη συνθήκη βραχυκύκλωσης προκειμένου να τήκεται άμεσα η προτεταμένη ασφάλεια του δικτύου χαμηλής τάσης. Τέλος γίνεται αναφορά σε θέματα αντοχής των διαφόρων αγωγών του δικτύου διανομής μέσω διαγραμμάτων ρεύματος – χρόνου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο επισημαίνονται αρχικά οι βασικοί κανόνες προστασίας σε εναέριο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης με σκοπό την προστασία του δικτύου έναντι βραχυκυκλωμάτων. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο προσδιορισμό των μέγιστων και ελάχιστων βραχυκυκλωμάτων καθώς και στη ρύθμιση προστασιών ηλεκτρονόμων αναχωρήσεων των γραμμών Μ.Τ. Επίσης παρουσιάζονται πρακτικοί κανόνες για τη συνεργασία (επιλογικότητα) των μέσων προστασίας που εφαρμόζονται κατά τη διενέργεια μιας μελέτης προστασίας. Τέλος, δίνονται δύο παραδείγματα μελέτης προστασίας σε γραμμές Μέσης Τάσης, με τη βοήθεια του προγράμματος PSS ADEPT και απεικονίζονται ενδεικτικά διαγράμματα αλληλουχίας της προστασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

“ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”

1.Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Το σύνολο των εγκαταστάσεων που απαιτούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών ονομάζεται Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και για να φέρει σε πέρας αυτή την αποστολή, θα πρέπει να διαθέτει τις παρακάτω μονάδες :

Σταθμούς Παραγωγής, εγκατεστημένους στις πιο πρόσφορες περιοχές για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε επαρκείς ποσότητες. Η επιλογή της περιοχής που θα εγκατασταθεί ένας σταθμός παραγωγής είναι αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής μελέτης.

Γραμμές Μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης

Γραμμές Διανομής, για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους επιμέρους καταναλωτές, ώστε να χρησιμοποιηθεί από αυτούς μετατρεπόμενη σε άλλες πιο εξυπηρετικές μορφές (π.χ. φως, θερμότητα, κίνηση κ.λπ.)

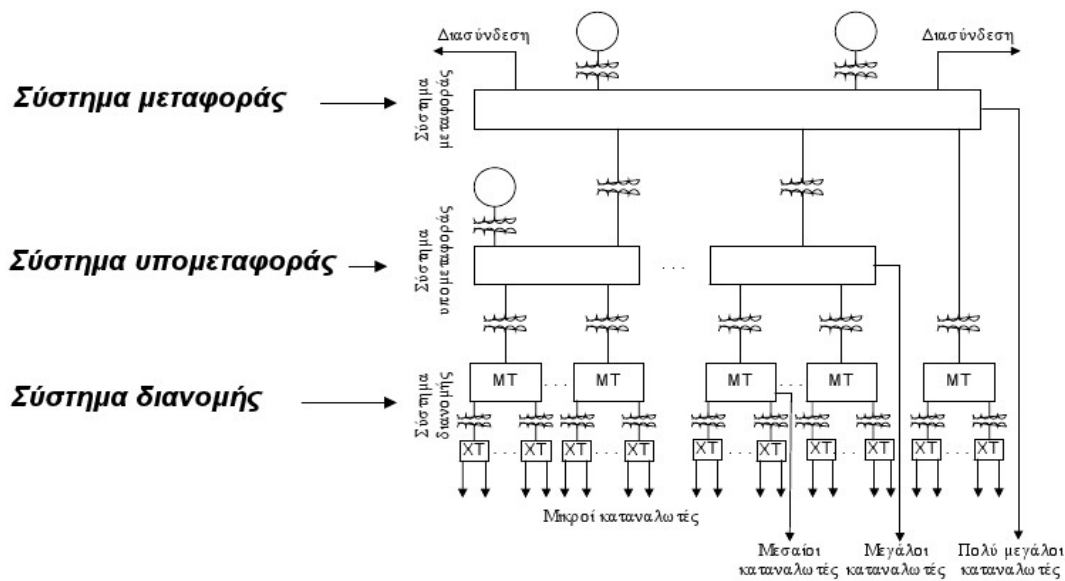
Για να είναι πρακτικό ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχει σχεδιασθεί και να λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ασφαλές, αξιόπιστο, φιλικό προς το περιβάλλον και να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια καλής ποιότητας στη χαμηλότερη κατά το δυνατόν τιμή. Η εξασφαλισμένη και αδιάλειπτη τροφοδοσία με ηλεκτρική ισχύ, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σύγχρονη ζωή.

1.1 Δομή ΣΗΕ

Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι το μέγεθός του. Άλλη είναι η δομή ενός μεγάλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετεί μία εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή και άλλη η δομή ενός μικρού συστήματος που εξυπηρετεί μία μικρή περιοχή.

Δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες για τον τρόπο δόμησης ενός ΣΗΕ. Ωστόσο όλα τα συστήματα εργάζονται σε διάφορα επίπεδα τάσης που χωρίζονται μεταξύ τους με μετασχηματιστές. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα διαφορετικά επίπεδα τάσης που εμφανίζονται σε αυτό διαιρείται σε τρία υποσυστήματα: στο Σύστημα Μεταφοράς, στο Σύστημα Υπομεταφοράς και στο Σύστημα Διανομής .

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο τρόπος δόμησης ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας :



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [1]

Στο σύστημα διανομής χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης διανομής, η πρωτεύουσα τάση ή τάση τροφοδοσίας (π.χ. 15,20,22 k V) που χαρακτηρίζεται και ως μέση τάση (MT) και η δευτερεύουσα τάση ή τάση κατανάλωσης (π.χ. 400 V) που χαρακτηρίζεται και ως χαμηλή τάση (XT).

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης καθώς και τους μετασχηματιστές (YT/MT) με τους οποίους η υψηλή τάση υποβιβάζεται σε μέση τάση και τους μετασχηματιστές διανομής (MT/XT) με τους οποίους η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής, ενώ το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης στις αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι κατά κανόνα υπόγεια, ενώ στις άλλες περιοχές εναέρια.

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται σε τεχνολογίες, που καλύπτουν ποικίλα και σημαντικά τεχνικά θέματα, όπως η εγκατάσταση και συντήρηση εναέριων γραμμών, υπόγειων καλωδίων, μετασχηματιστών, μετρητικών διατάξεων, διακοπών, ασφαλειών κλπ.

Το σύστημα διανομής είναι το πιο δαπανηρό και πολύπλοκο μέρος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει μέχρι και το ήμισυ του επενδυμένου κεφαλαίου του στο δίκτυο διανομής.

Το σύστημα υπομεταφοράς διανέμει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα αριθμό υποσταθμών διανομής, που βρίσκονται σε κάποια γεωγραφική περιοχή σε ένα επίπεδο τάσης που τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 23 kV και 150 kV. Αυτό δέχεται την ενέργεια είτε κατευθείαν από σταθμούς παραγωγής είτε από το σύστημα μεταφοράς μέσω υποσταθμών (ζεύξεως ή/και μετασχηματισμού). Μεγάλοι καταναλωτές είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν κατευθείαν από το σύστημα υπομεταφοράς.

Ο ρόλος ενός συστήματος υπομεταφοράς είναι κυρίως ο ίδιος με εκείνον ενός συστήματος διανομής με μόνη διαφορά ότι αυτό εξυπηρετεί μία μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή και διανέμει ενέργεια σε μεγαλύτερα επίπεδα τάσης και ισχύος. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε πολλά συστήματα δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς. Συνήθως καθώς οι απαιτήσεις μας σε ενέργεια αυξάνονται, αυξάνονται και τα απαραίτητα επίπεδα τάσης, επομένως τα δίκτυα υπομεταφοράς του σήμερα είναι συνήθως τα δίκτυα μεταφοράς του χθες. Τέλος, το σύστημα μεταφοράς διαφέρει και ως προς τη λειτουργία και ως προς τα χαρακτηριστικά από τα συστήματα διανομής και υπομεταφοράς. Ενώ τα δύο τελευταία συστήματα μεταφέρουν ενέργεια από μία πηγή προς τα επιμέρους φορτία, το σύστημα μεταφοράς αφενός χειρίζεται μεγαλύτερα ποσά ισχύος αφετέρου διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία μεγάλης κατανάλωσης του συστήματος.

Η ενέργεια μπορεί να διακινηθεί προς κάθε επιθυμητή κατεύθυνση μέσω των διαφόρων γραμμών του συστήματος μεταφοράς και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη οικονομικά λειτουργία του συστήματος.

Το σύστημα μεταφοράς δέχεται κατευθείαν την ενέργεια από σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης και είναι δυνατόν να εξυπηρετεί κατευθείαν πολύ μεγάλους καταναλωτές και να ανταλλάσσει, μέσω διασυνδεδετικών γραμμών, ενέργεια με άλλα γειτονικά ενεργειακά συστήματα.

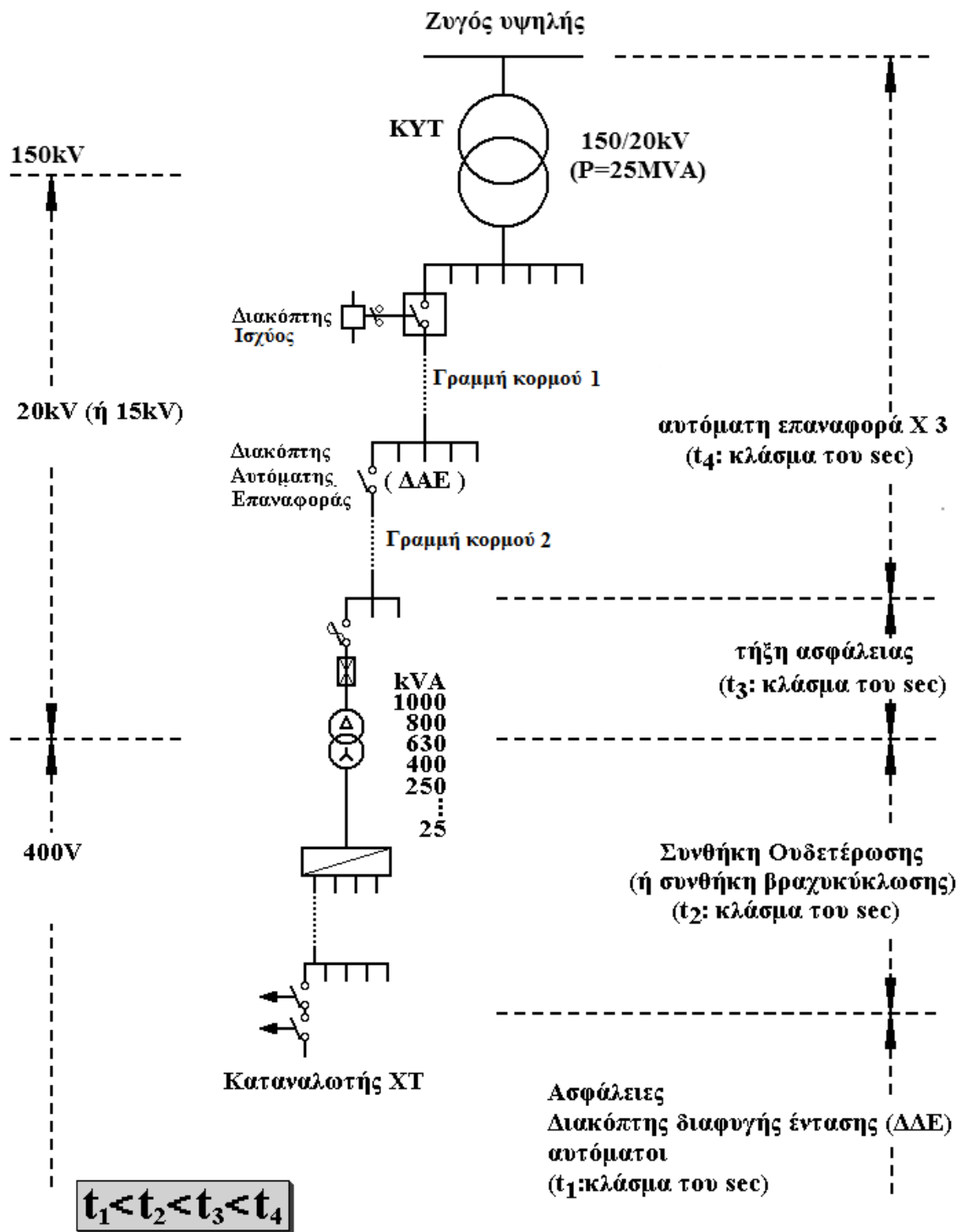
Η βασική διαφορά στο σκοπό που εξυπηρετεί το σύστημα μεταφοράς, συγκρινόμενο με τα συστήματα διανομής και υπομεταφοράς, φαίνεται στον τρόπο δόμησης των δικτύων. Ενώ τα δύο τελευταία έχουν συνήθως ακτινική δομή, επειδή σκοπεύουν στο να διοχετεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, το σύστημα μεταφοράς έχει δομή βρόγχου και συνεπώς είναι σε θέση να διοχετεύει την ενέργεια σε μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων και εξυπηρετεί έτσι καλύτερα το σκοπό μεταφοράς.[1]

1.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο όρος “διανομή ηλεκτρικής ενέργειας” περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές.

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τις γραμμές διανομής που ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής και είναι γνωστές σαν γραμμές μέσης τάσης, τους υποσταθμούς διανομής όπου μετασχηματίζεται η μέση τάση στην χαμηλή τάση και τέλος τις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης που ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής και καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών.

Στο σχήμα 1.2 δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (π.χ. 150 kV/20 kV, 25 MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω διακοπών ισχύος (ΔΙ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται “γραμμές κορμού”. Η καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε επιμέρους γραμμές, που αφορούν στην ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής), μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ). Και αυτές οι γραμμές επίσης ονομάζονται “γραμμές κορμού”. [2,16]. Οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού μέσης τάσης προς χαμηλή τάση (20 kV/400 V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων, ισχύος μέχρι 400 kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλισοζευκτών ή τριπολικών ασφαλισοζευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων.



Σχήμα 1.2: Απλοποιημένο παράδειγμα της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.[2]

Οι γραμμές διανομής πρέπει να εξασφαλίζουν καλή και οικονομική λειτουργία και το βασικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει αυτή τη λειτουργία είναι η πτώση τάσης στην γραμμή διανομής που οφείλεται στην κατανομημένη αντίσταση κατά μήκος της. Τόσο η αντίσταση όσο και η πτώση τάσης θα πρέπει να είναι ελάχιστες έτσι ώστε να εξασφαλίζεται σχετικά σταθερή τάση στους καταναλωτές. Σύμφωνα με τη σχέση της ωμικής αντίστασης $R = \frac{\rho * l}{A}$, συνάγεται ότι μείωση της αντίστασης μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της διατομής των αγωγών, πράγμα που απαιτεί μεγαλύτερο κόστος της εγκατάστασης.

Οι παράγοντες που διαμορφώνουν τους τεχνικούς περιορισμούς για επιλογή των διατομών και του είδους των αγωγών ή των καλωδίων, ανάλογα του εάν πρόκειται για εναέρια ή υπόγεια δίκτυα, είναι κυρίως η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση που καθορίζεται από το θερμικό όριο φόρτισης, η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, η μηχανική αντοχή, οι απώλειες Corona (για τη MT και όχι τη XT).

Επιπλέον η επιλογή των αγωγών γίνεται και με οικονομικά κριτήρια για ελάττωση του κόστους αλλά και με βάση το φυσικό περιβάλλον που θα τοποθετηθούν. Για παράδειγμα οι αγωγοί ACSR χρησιμοποιούνται σε περιοχές κανονικής διαβρωτικότητας ενώ σε περιοχές με έντονη διαβρωτικότητα, όπως οι παραθαλάσσιες, χρησιμοποιούνται αγωγοί Cu.

Η συνεχής τροφοδότηση των καταναλωτών εξασφαλίζεται με τις πολλαπλές συνδέσεις των φορτίων στο δίκτυο, ενώ η συνεχής επίβλεψη του δικτύου με τις κατάλληλες συσκευές και ειδικευμένα συνεργεία άμεσης επισκευής βλαβών.

Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς και λειτουργούν με τάση πολιτική 20 kV αν και υπάρχουν ακόμα γραμμές 22, 15 και 6.6 kV. Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, υπό χαμηλή τάση, είναι τυποποιημένη για την Ελλάδα και την Ευρώπη και γίνεται με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα 50 Hz και τάση 230/400 V. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης εκτός των τριών αγωγών φάσεων περιλαμβάνουν και ουδέτερο αγωγό. Οι υποσταθμοί διανομής μετασχηματίζουν τη μέση τάση σε χαμηλή τάση, η παρεχόμενη ισχύς τους είναι μικρή και κατασκευάζονται μέσα σε πόλεις σε σημεία που εξυπηρετούν καλύτερα τους καταναλωτές.[3]

1.2.1 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Δικτύων Διανομής

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με την τάση, το μήκος, τη θέση και τη δομή.

Τάση

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση (πολική τριφασικού συστήματος), σε δίκτυα «υψηλής τάσης» (35 – 150 kV), δίκτυα «μέσης τάσης» (1 – 35 kV) και δίκτυα «χαμηλής τάσης» (100 – 1000 V).

Στο ελληνικό σύστημα διανομής περιλαμβάνονται οι εξής πολικές τιμές τάσεως:

- Δίκτυα Μέσης Τάσης (6,6 kV- 15kV-20 kV)
- Δίκτυα Χαμηλής Τάσης (220/380 V)

Τα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης της τάσης καθορίστηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC) και εγκρίθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση και τη χώρα μας.[4] Η ονομαστική τιμή της χαμηλής τάσης είναι 230/400 V. Η τάση τροφοδότησης των καταναλωτών επιτρέπεται να κυμαίνεται στο $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης, δηλαδή από 207 έως 253 V. Μέτρα για τη ρύθμιση της τάσης είναι η εκλογή θέσης στους μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης (tapchangers) και η κατάλληλη επιλογή διατομής γραμμών ΧΤ. Η ονομαστική τιμή της μέσης τάσης είναι 20, 15 ή 6.6 kV. Η τάση τροφοδότησης των καταναλωτών επιτρέπεται να κυμαίνεται στο $\pm 10\%$ της ονομαστικής τάσης. Συνεπώς στα δίκτυα των 20 kV τα όρια είναι από 18 έως 22 kV, Στα δίκτυα των 15 kV τα όρια είναι από 13.5 έως 16.5 kV και στα δίκτυα των 6.6 kV τα επιτρεπόμενα όρια είναι από 5.94 έως 7.26 kV.

Μήκος

Οι γραμμές διανομής διακρίνονται ανάλογα με το μήκος τους ως εξής :

- Μικρού Μήκους, όταν το μήκος είναι μέχρι 20km
- Μέτριου Μήκους, όταν το μήκος είναι από 20 km - 40km
- Μεγάλου Μήκους, όταν το μήκος τους υπερβαίνει τα 40 km

Οι γραμμές διανομής ΜΤ ξεκινούν από υποσταθμούς υποβιβασμού 150/20 kV και καταλήγουν σε υποσταθμούς διανομής 20/0,4 kV (είτε του δικτύου π.χ. τροφοδότηση σπιτιών, καταστημάτων κ.λπ. με ΧΤ, είτε των χρηστών ΜΤ π.χ. εργοστάσια, νοσοκομεία κ.λπ. με ιδιόκτητους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ).

Θέση

Τα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και σε υπόγεια. Τα εναέρια δίκτυα, χρησιμοποιούνται ως δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι τα πλέον διαδεδομένα και παρουσιάζουν ευκολία στην κατασκευή, στην επιθεώρηση και στη συντήρησή τους. Οι χρησιμοποιούμενοι στύλοι ανάρτησης γραμμών στα εναέρια δίκτυα διανομής είναι συνήθως τσιμεντένιοι ή ξύλινοι. Οι χρησιμοποιούμενοι αγωγοί είναι συνήθως από αλουμίνιο, απλό στα δίκτυα χαμηλής τάσης ή ενισχυμένο με χαλύβδινη ψυχή στα δίκτυα μέσης τάσης ή κράματα αλουμινίου. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αγωγοί χαλκού, σήμερα όμως η χρήση τους περιορίζεται σε περιοχές έντονης διάβρωσης.

Τα υπόγεια δίκτυα, χρησιμοποιούνται στις αστικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου η πυκνότητα φορτίου είναι αρκετά μεγάλη και δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτήρια αλλά επίσης και για λόγους αισθητικής. Για την κατασκευή τους απαιτούνται ειδικά ακροκιβώτια και καλώδια, και γι' αυτό το λόγο, το κόστος κατασκευής τους είναι πολλαπλάσιο έναντι των εναέριων.

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού της μέσης σε χαμηλή τάση των υπόγειων δικτύων κατασκευάζονται συνήθως στα υπόγεια πολυκατοικιών ή κάτω από τα πεζοδρόμια ή τις πλατείες. Σπανιότερα κατασκευάζονται επίγειοι εντός των οικίσκων.

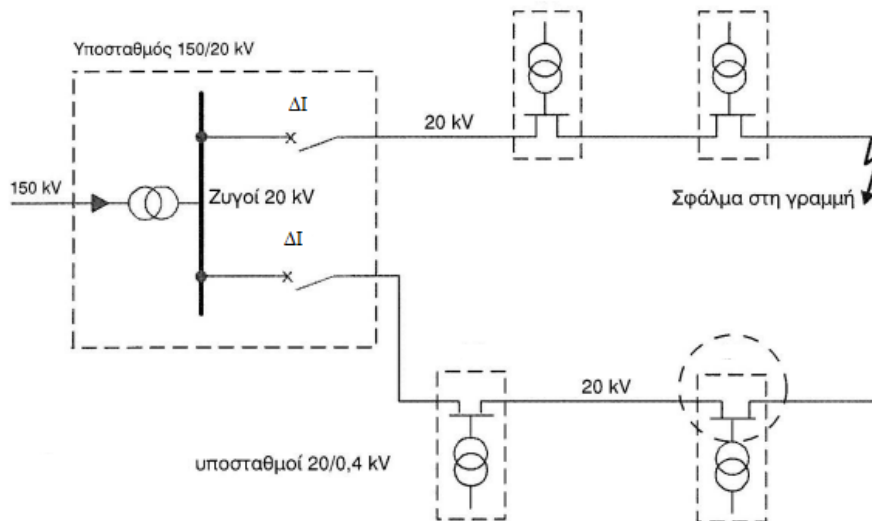
Σημαντικό πλεονέκτημα των εναερίων δικτύων σε σχέση με τα υπόγεια δίκτυα είναι η εύκολη προσβασιμότητά τους, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τον ταχύτερο εντοπισμό και αποκατάσταση των βλαβών και ως εκ τούτου χαμηλότερο κόστος συντήρησης.

Δομή

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται με βάση τη δομή τους σε [3] ανοιχτά-ακτινικά και κλειστά-βροχοειδή.

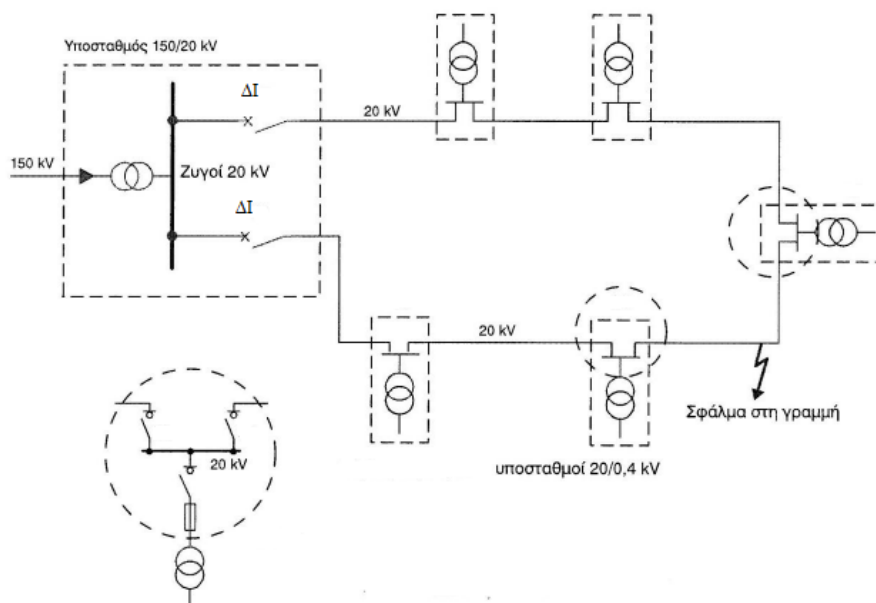
Στα ακτινικά δίκτυα οι γραμμές των 20 kV (συνήθως εναέριες) αναχωρούν από τον κεντρικό υποσταθμό 150/20 kV της ΔΕΗ και απλώνονται σαν της ακτίνες της κύκλου. Κατά μήκος κάθε γραμμής συνδέονται οι καταναλωτές ΜΤ. Κάθε χρήστης ΜΤ πρέπει να διαθέτει το δικό του ιδιωτικό Υ/Σ για να μπορέσει να συνδεθεί με ασφάλεια στο δίκτυο της ΜΤ.

Βασικό μειονέκτημα των ακτινικών δικτύων είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, ο διακόπτης ισχύος ΔΙ (Σχήμα 1.3) που υπάρχει στην αρχή της γραμμής ανοίγει με αποτέλεσμα όλοι οι καταναλωτές κατά μήκος της γραμμής να μείνουν χωρίς τάση.



Σχήμα 1.3: Ακτινικό δίκτυο διανομής

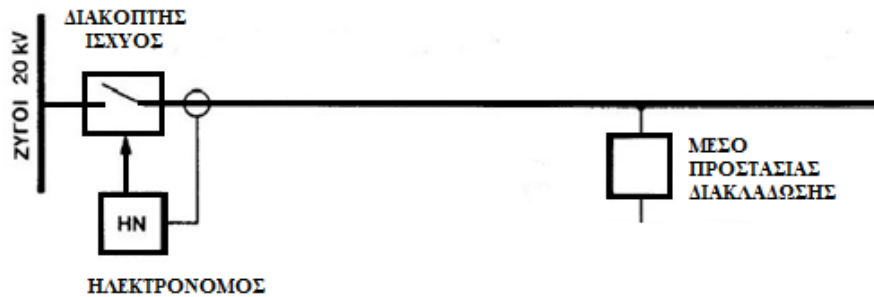
Στο βροχοειδές δίκτυο διανομής κάθε καταναλωτής μπορεί να τροφοδοτηθεί από τουλάχιστον δύο σημεία με αποτέλεσμα τη δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση βλάβης. Τα κλειστά δίκτυα κατασκευάζονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και κοστίζουν περισσότερο από τα ανοικτά δίκτυα. Η δομή ενός τέτοιου δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.4: Βροχοειδές δίκτυο διανομής

1.2.2 Μέσα προστασίας και ζεύξεως δικτύου διανομής ΜΤ

1.2.2.1 Διακόπτες ισχύος



Σχήμα 1.5: Γραμμή διανομής μέσης τάσης με διακλάδωση

Σε κάθε αναχώρηση από τον υποσταθμό 150/20 kV, εναέριας γραμμής Μ.Τ (Σχήμα 1.5) το μέσο προστασίας είναι διακόπτης ισχύος ΔΙ. Ο οποίος διεγείρεται από έναν ηλεκτρονόμο ΗΝ, που τροφοδοτείται μέσω Μ/Σ έντασης από το δίκτυο, παρακολουθεί το ρεύμα και αν το ρεύμα είναι ανεπίτρεπτα μεγάλο, στέλνει στον διακόπτη ισχύος εντολή να ανοίξει.

Οι ΔΙ ανοίγουν και κλείνουν το κύκλωμα σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, δηλ. τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε βραχυκύκλωμα. Τα ρεύματα που μπορούν να διακόψουν στο δίκτυο 20 kV είναι πάνω από 7 kA. Η θεωρητική μέγιστη κρουστική τιμή του ρεύματος στα 7 kA είναι 20 kA. Ο ΔΙ είναι σε θέση να αντέξει, αμέσως μετά τη σβέση του τόξου, στην επιβαλλόμενη τάση του δικτύου. Οι διακόπτες ισχύος, ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται για τη σβέση του τόξου χωρίζονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- πτωχού ελαίου (oil-minimum)
- εξαφθοριούχου θείου (SF₆)
- κενού (vacuum)



Εικόνα 1: Διακόπτης ισχύος αναχώρησης τύπου φορείου 20kV, 1250A εσωτερικού χώρου. Φέρει ηλεκτρονόμους υπερέντασης φάσεων-γης και εκτελεί κύκλο λειτουργίας πτώσεων- επαναφορών



Εικόνα 2: Διακόπτης Αυτομάτου Επαναφοράς εξωτερικού χώρου, 20kV, 630A, στερεάς μόνωσης με διακοπή σε φιάλες κενού. Φέρει ηλεκτρονόμους υπερέντασης φάσεων-γης και εκτελεί κύκλο λειτουργίας πτώσεων-επαναφορών



Εικόνα 3: Πίνακας ελέγχου του ΔΑΕ εξωτερικού χώρου.

Στις δεκαετίες 1970-1990 κυριάρχησε ο διακόπτης πτωχού ελαίου (ονομάστηκε έτσι σε αντιδιαστολή με τους προηγούμενους διακόπτες ισχύος που χρησιμοποιούσαν πολλαπλάσιες ποσότητες λαδιού). Στην τελευταία δεκαετία αντικαταστάθηκε από το διακόπτη ισχύος με SF₆. Το αέριο SF₆ είναι ένα αδρανές αέριο με άριστες μονωτικές ιδιότητες που βρίσκεται μέσα στους πόλους του διακόπτη.

Οι ΔΙ με κενό χρησιμοποιούν σαν μονωτικό το κενό, δηλαδή την έλλειψη οποιουδήποτε αερίου. Σημειώνεται ότι το απόλυτο κενό είναι το τέλειο μονωτικό.

Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας με χαρακτηριστικά μεγέθη αυτόματου διακόπτη ισχύος, προστασίας των αναχωρήσεων μέσης τάσης σε Υ/Σ 150/20kV.

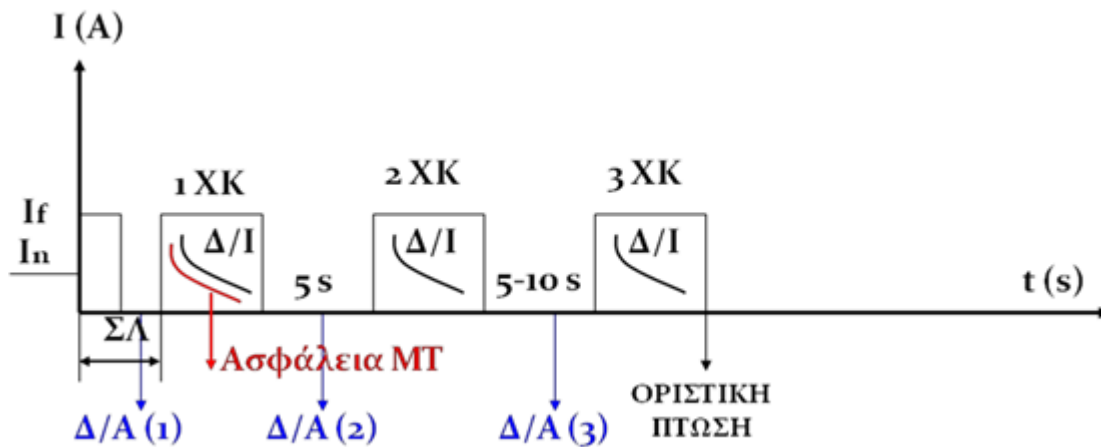
Ονομαστική τάση (U _N)	Η μέγιστη τάση στην οποία απενεργοποιείται ο διακόπτης	24kV
Ονομαστική ένταση ρεύματος στους 40 °C (I _N)	Η ένταση του ρεύματος που επιτρέπεται να διέρχεται συνεχώς από τις επαφές του διακόπτη	1250A
Μέγιστη ένταση ζεύξης (I _z)	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα όταν ο διακόπτης κλείνει σε βραχυκύκλωμα	31,5A
Μέγιστη ένταση απόζευξης	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος στην οποία διακόπτεται το κύκλωμα με ορισμένο συντελεστή ισχύος	11,5kA/0,7επ.
Ένταση θερμικής αντοχής	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που αντέχει ο διακόπτης για 1 s	10kA
Ισχύς απόζευξης (S _k)	Η φαινόμενη ισχύς που υπολογίζεται από την σχέση $S_k = 3 * \sqrt{U_k} * I_k$ και πρέπει να είναι τουλάχιστον 250MVA	500MVA

Πίνακας 1.1: χαρακτηριστικά μεγέθη αυτόματου διακόπτη ισχύος, προστασίας των αναχωρήσεων μέσης τάσης σε Υ/Σ 150/20kV[6]

Ο χρόνος της στιγμιαίας λειτουργίας κυμαίνεται από 90-150 ms και εξαρτάται από τον τύπο του ηλεκτρονόμου προστασίας και τον τύπο του διακόπτη ισχύος του υποσταθμού ή τον τύπο του ΔΑΕ. Η επαναφορά της τάσης είναι συνήθως της τάξης των 0,5 s. Ο χρόνος πτώσης με χρονική καθυστέρηση (timedelayed) εξαρτάται από το μέγεθος του σφάλματος και την καμπύλη χρόνου-ρεύματος που έχει επιλεγεί (καμπύλη αντιστρόφου χρόνου). Ο χρόνος επαναφοράς της τάσης ρυθμίζεται σε 5-10 s. Η προστασία του κορμού γίνεται από τον διακόπτη ισχύος του υποσταθμού 150/20-15 kV ή από τον διακόπτη ισχύος του υποσταθμού και ένα ΔΑΕ, για γραμμές μεγάλου μήκους. Η προστασία των διακλαδώσεων γίνεται μέσω ασφαλισοζευκτών (A/Z) και διακοπών απομόνωσης (ΔΑ). Οι Μ/Σ διανομής από την πλευρά της μέσης τάσης ασφαλιζονται με A/Z ταχείας τήξεως τύπου K.

Ο ΔΙ του υποσταθμού και ο ΔΑΕ, είναι διακόπτες ισχύος διαθέτουν προστασία υπερέντασης έναντι σφαλμάτων φάσεων και γης, έχουν πίνακα ελέγχου και εκτελούν κύκλο λειτουργίας πτώσεων-αυτομάτων επαναφορών σε περίπτωση σφάλματος. Στα εναέρια δίκτυα διανομής Μ.Τ. ρυθμίζονται συνήθως σε μία στιγμιαία λειτουργία ακολουθούμενη από τρεις λειτουργίες με χρονική καθυστέρηση (1-3). Το παροδικό σφάλμα απαλείφεται με τη στιγμιαία λειτουργία, ενώ σε μόνιμο σφάλμα φάσεων ή γης, στην πρώτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση τήκονται τα τηκτά των A/Z που προστατεύουν τις διακλαδώσεις. Τα μεγέθη των τηκτών των A/Z εκτόνωσης που χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακλαδώσεων Μ.Τ. είναι μέχρι 30 A βραδείας τήξεως (30 T) μετά από τον ΔΙ του υποσταθμού 150/20-15 kV και 20 A (20 T) μετά από ΔΑΕ. Όταν το μέγιστο φορτίο της διακλάδωσης υπερβαίνει τα 30 A χρησιμοποιούνται μονοπολικοί και τριπολικοί ΔΑ, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 1.2.4.4. Κατ' εξαίρεση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ΔΑ σε μικρότερα φορτία διακλαδώσεων, όπου δεν εξασφαλίζεται η συνεργασία τους με τους διακόπτες ισχύος του υποσταθμού 150/20-15 kV, ή ΔΑΕ για παροδικά σφάλματα. Η πιθανότητα αυτή όμως είναι ελάχιστη, αφού σήμερα χρησιμοποιούνται ψηφιακά ρελέ με μειωμένο χρόνο απόκρισης και είναι διαθέσιμες περισσότερες χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-έντασης σφάλματος που μπορούν να επιλεγθούν.

Για τη μελέτη της προστασίας μιας γραμμής, χρησιμοποιούνται μηχανογραφικά προγράμματα όπως PSS/ADEPT, SINCAL κ.λπ. Ο κύκλος λειτουργίας του ΔΙ ή του ΔΑΕ, καθώς και η λειτουργία των ΔΑ και των A/Z φαίνονται παρακάτω, στο σχήμα 1.6.[5]



Σχήμα 1.6: Κύκλος λειτουργίας ΔΙ ή ΔΑΕ, αναλυτικά:

- ΣΛ: Στιγμαία λειτουργία του ΔΙ ή ΔΑΕ
- 1XK: Πρώτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του ΔΙ ή ΔΑΕ
- 2XK: Δεύτερη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του ΔΙ ή ΔΑΕ
- 3XK: Τρίτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση του ΔΙ ή ΔΑΕ
- ΔΑ(1): Ρύθμιση ΔΑ σε μια λειτουργία
- ΔΑ(2): Ρύθμιση ΔΑ σε δύο λειτουργίες
- ΔΑ(3): Ρύθμιση ΔΑ σε τρεις λειτουργίες

Οι ηλεκτρονόμοι έχουν στοιχεία που παρακολουθούν τα εξής ρεύματα :

- Τα ρεύματα φάσεων σε μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά σφάλματα οπότε και λέγονται Η Ν φάσεων και
- Τα ρεύματα γης στα οποία μετρούν το άθροισμα των φασικών ρευμάτων δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει τη γείωση του Μ/Σ γι' αυτό και λέγονται ΗΝ γης. Σε σφάλματα φάσεων έχουμε μεγαλύτερα ρεύματα σε σχέση με τα σφάλματα γης (μονοφασικά σφάλματα) γιατί η αντίσταση γείωσης του ουδέτερου του δικτύου των 20kV είναι σχετικά μεγάλη (12 Ω). Για τον λόγο αυτό οι ΗΝ γης είναι ρυθμισμένοι να αντιδρούν σε χαμηλότερα ρεύματα απ' ότι οι ΗΝ φάσεων.

Οι Η/Ν του δικτύου ΜΤ διακρίνονται σε :

- Απλούς ΗΝ υπερεντάσεως που δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση
- Στους ΗΝ υπερεντάσεως που εξαρτώνται από την κατεύθυνση

Οι απλοί ΗΝ χωρίζονται στους :

- ΗΝ υπερεντάσεως στιγμιαίας λειτουργίας, στους οποίους μόλις το ρεύμα υπερβεί ένα όριο δίνουν εντολή να ανοίξει ακαριαία ο ΔΙ,
- Η/Ν υπερεντάσεως χρονικής καθυστέρησης

Οι Η/Ν υπερεντάσεως χρονικής καθυστέρησης με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

- Σταθερού χρόνου, οι οποίοι ανεξάρτητα του μεγέθους της υπερέντασης λειτουργούν στον ίδιο χρόνο που καθορίζεται από τη ρύθμιση τους.
- Αντιστρόφου χρόνου, στους οποίους ο χρόνος λειτουργίας μειώνεται όσο αυξάνει η υπερένταση.

Οι Η/Ν με χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου έχουν σκοπό την προστασία από θερμικές καταπονήσεις των στοιχείων του δικτύου ΜΤ. Οι χαρακτηριστικές προσδιορίζουν για κάθε ρεύμα πότε θα ανοίξει ο διακόπτης και ονομάζονται καμπύλες χρονικής καθυστέρησης. Για λόγους συντονισμού των διακοπών, ενδείκνυται οι χρόνοι ανοίγματος του διακόπτη της ΔΕΗ να είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με αυτούς των διακοπών των καταναλωτών. Υπάρχει ένα ελάχιστο ρεύμα κάτω από το οποίο δεν δίνει εντολή πτώσης ο Η/Ν. Αυτό το ρεύμα χαρακτηρίζει και τη ρύθμιση. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες τυποποιήσεις, ανάλογα με το ρυθμό μείωσης του χρόνου διακρίνονται τρεις τύποι:

- Οι απλώς αντιστρόφου χρόνου
- Οι πολύ αντιστρόφου χρόνου
- Οι εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου

Επισημαίνεται, ότι οι χρήστες ΜΤ ή ΧΤ τροφοδοτούνται μέσω διακλάδωσεων ΜΤ, από την κύρια γραμμή. Η ΔΕΗ εγκαθιστά πάντα ένα μέσο προστασίας της διακλάδωσης (Σχήμα 1.5). Το μέσο προστασίας είναι ρυθμισμένο ή επιλεγμένο έτσι ώστε σε περίπτωση σφαλμάτων στην διακλάδωση να διακόπτεται η διακλάδωση, μετά τη στιγμιαία λειτουργία του ΔΙ στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Έτσι μετά την επαναφορά του ΔΙ οι υπόλοιποι καταναλωτές Μ.Τ. που τροφοδοτούνται από την ίδια κύρια γραμμή, παραμένουν υπό τάση. Το μέσο προστασίας της διακλάδωσης εγκαθίσταται από τη ΔΕΗ και μπορεί να είναι :

- Ασφάλειες μέσης τάσης, όταν το μέγιστο ρεύμα της διακλάδωσης είναι μέχρι 30 Α.
- Διακόπτες απομόνωσης που συνεργάζονται με το ΔΙ, όταν το μέγιστο ρεύμα της διακλάδωσης είναι μεγαλύτερο από 30 Α.

Σημειώνεται ότι στο εναέριο δίκτυο χρησιμοποιούνται ως μέσα ζεύξεως οι μονοπολικοί και τριπολικοί αποζεύκτες καθώς και διακόπτες φορτίου, προκειμένου να απομονώνεται η γραμμή σε περίπτωση για παράδειγμα που απαιτείται να γίνει συντήρηση της γραμμής.

1.2.2.2 Ασφάλειες μέσης τάσης

Οι ασφάλειες μέσης τάσης (τηκτά), σε αντίθεση με τις ασφάλειες χαμηλής τάσης, χρησιμοποιούνται μόνο για την προστασία από βραχυκυκλώματα και όχι για την προστασία από υπερφορτίσεις.

Οι ασφάλειες μέσης τάσης είναι κυλινδρικές με σώμα από πορσελάνη ή άλλο μονωτικό υλικό. Κατασκευάζονται για διάφορες ονομαστικές τάσεις και ονομαστικές εντάσεις. Το μήκος τους είναι ανάλογο της ονομαστικής τους τάσης και η διάμετρος τους ανάλογη της ονομαστικής τους έντασης.



Εικόνα 4: Διάφορες ασφάλειες

Διακρίνουμε δύο είδη ασφαλειών στη μέση τάση:

- ασφάλειες εκτόνωσης
- ασφάλειες σκόνης (HRC κατά IEC 282-1) υψηλής ικανότητας διακοπής

Τις ασφάλειες εκτόνωσης τις συναντάμε στα σημεία διακλαδώσεων των εναέριων δικτύων της ΔΕΗ. Αποτελούνται από ένα κοίλο μονωτικό σωλήνα διαμέτρου 2-3 cm και μήκους 30-35 cm, το εσωτερικό του οποίου είναι καλυμμένο με βορικό οξύ. Στο εσωτερικό του σωλήνα υπάρχει ένας αγωγός, το τηκτό, τανυσμένος με ελατήριο. Σε περίπτωση υπερέντασης, το τηκτό τήκεται (λιώνει), δημιουργείται τόξο στο εσωτερικό του σωλήνα, το οποίο παράγει υδρατμούς που βοηθούν στη σβέση του τόξου.



Εικόνα 5: Διακλάδωση εναέριας γραμμής μέσης τάσεως με ασφαλειοαποζεύκτες (A/Z), μονωτήρες στηρίξεως και αναρτήσεως

Οι ασφάλειες σκόνης έχουν ένα πυρήνα από κεραμικό υλικό, πάνω στο οποίο είναι τυλιγμένο σε μορφή σπείρας το τηκτό. Το τηκτό είναι από κράμα αργύρου για να έχει όσο γίνεται μικρότερη αντίσταση. Ο τυλιγμένος αγωγός βρίσκεται σε σκόνη χαλαζία. Το εξωτερικό περίβλημα είναι από πορσελάνη.

Όταν το ρεύμα ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή, τότε τήκεται ο αγωγός σε ένα ή περισσότερα σημεία, με αποτέλεσμα η ενέργεια που εκλύει το τόξο να απορροφάται από τη χαλαζιακή άμμο που λειώνει και μετατρέπεται σε πορσελάνη. Η αντίσταση που παρεμβάλλεται στο δρόμο του βραχυκυκλώματος είναι τεράστια και το ρεύμα βραχυκυκλώματος περιορίζεται προτού φτάσει στη μέγιστη τιμή του (κορυφή). Αυτό έχει ως συνέπεια, πέρα από την διακοπή του σφάλματος, και το σημαντικό περιορισμό της κορυφής του ρεύματος βραχυκυκλώματος, που σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να δημιουργήσει δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις στον εξοπλισμό του υποσταθμού.

Οι ασφάλειες HRC διαθέτουν και ένα δείκτη λειτουργίας που συγκρατείται με ελατήριο. Όταν η ασφάλεια λειτουργήσει το ελατήριο απελευθερώνεται και ο δείκτης εξέρχεται από το σώμα της ασφάλειας.

Η λειτουργία του δείκτη είναι διπλή:

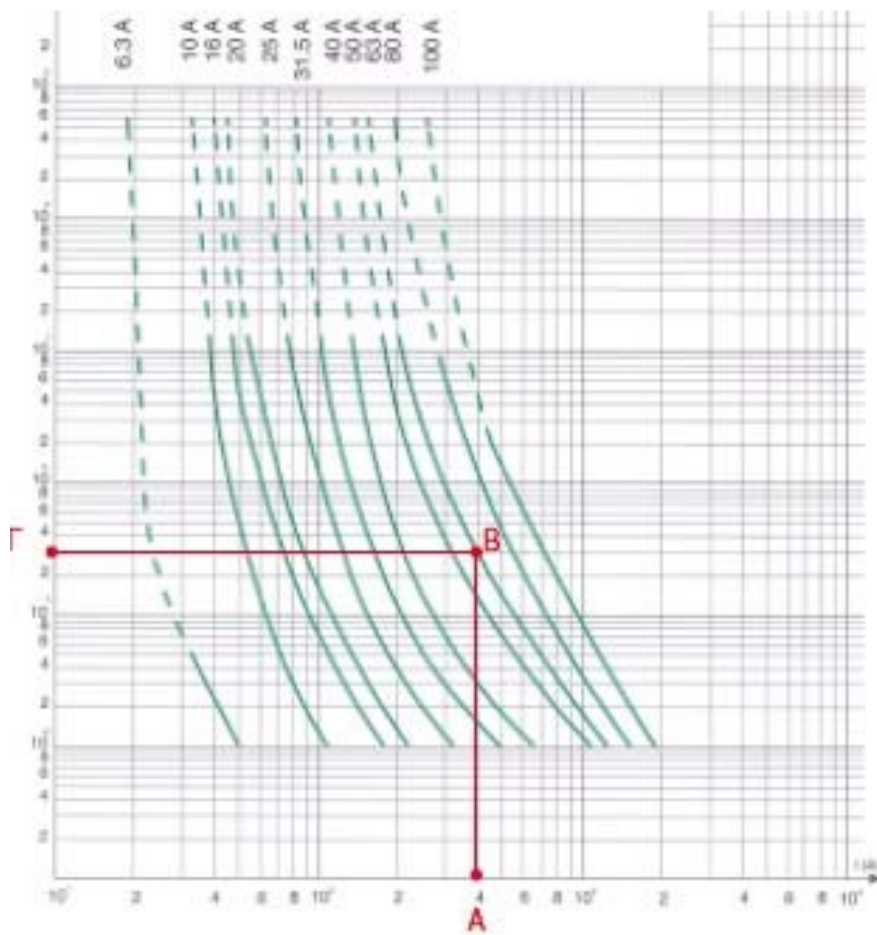
- α. δείχνει ότι η ασφάλεια έχει λειτουργήσει και συνεπώς πρέπει να αντικατασταθεί,
- β. χτυπά με δύναμη την άκρη ενός πλαστικού μοχλού που με τη βοήθεια ενός μηχανισμού δίνει εντολή απόζευξης στο διακόπτη φορτίου.

Για να μπορέσουμε να επιλέξουμε σωστά την ασφάλεια που θα χρησιμοποιήσουμε σε ένα δίκτυο, θα πρέπει να γνωρίζουμε το χρόνο που χρειάζεται η ασφάλεια να διακόψει το σφάλμα. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για τις ασφάλειες που συναντάμε στην πλευρά μέσης τάσης του μετασχηματιστή ισχύος, διότι θα πρέπει να συνεργαστούν με τις ασφάλειες (ή το διακόπτη ισχύος) που υπάρχουν στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 1.7 βλέπουμε τις καμπύλες που δείχνουν το χρόνο τήξης σε συνάρτηση με το ρεύμα. Οι καμπύλες αυτές ονομάζονται χαρακτηριστικές απόζευξης και για κάθε ασφάλεια υπάρχει μια χαρακτηριστική.

Σημειώνουμε ότι και οι δύο άξονες, δηλαδή ο χρόνος και το ρεύμα είναι βαθμολογημένοι λογαριθμικά για να περιορισθεί η έκταση του διαγράμματος.

Το αριστερό τμήμα κάθε χαρακτηριστικής είναι με διακεκομμένη γραμμή και δείχνει την περιοχή στην οποία πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία της ασφάλειας, γιατί η διακοπή της ασφάλειας δεν είναι εγγυημένη.



Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστικές απόξευξης ασφαλειών μέσης τάση

Στους παρακάτω πίνακες 1.2 (α,β), παρουσιάζονται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή ρεύματος σε συνάρτηση με το χρόνο διακοπής ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού, για τηκτά τύπου Κ(ταχείας τήξεως) και για τηκτά τύπου Τ (βραδείας τήξεως).

α) για τηκτά τύπου Κ

Ονομαστικό ρεύμα (A)	300 s Ρεύμα (A)		10 s Ρεύμα (A)		0.1 s Ρεύμα (A)	
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο
3	6	7,2	-	10	-	58
6	12,0	14.4	13,5	20,5	72	86
8	15	18	18	27	97	116
10	19,5	23.4	22,5	34	128	154
12	25	30	29,5	44	166	199
15	31,0	37.2	37,0	55	215	258
20	39	47	48,0	71	273	328
25	50	60	60	90	350	420
30	63	76	77,5	115	447	546
40	80	96	96	146	565	680
50	101	121	126	188	719	862
65	128	153	159	237	918	1100
80	160	192	205	307	1180	1420
100	200	240	258	388	1520	1820

β) για τηκτά τύπου Τ

Ονομαστικό ρεύμα (A)	300 s Ρεύμα (A)		10 s Ρεύμα (A)		0.1 s Ρεύμα (A)	
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέγιστο
3	6	7,2	-	11	-	100
6	12,0	14,4	15,3	23,0	120	144
8	15	18	20,5	31	166	199
10	19,5	23,4	26,5	40	224	269
12	25	30	34,5	52	296	355
15	31,0	37.2	44,5	67	388	466
20	39	47	57,0	85	496	595
25	50	60	73,5	109	635	762
30	63	76	93,0	138	812	975
40	80	96	120	178	1040	1240
50	101	121	152	226	1310	1570
65	128	153	195	291	1650	1975
80	160	192	248	370	2080	2500
100	200	240	319	475	2620	3150

Πίνακας 1.2 (α,β): Ρεύματα και χρόνοι διακοπής για την τήξη ασφαλειών α) τύπου Κ (ταχείας τήξεως) και β) τύπου Τ (βραδείας τήξεως), ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα του τηκτού, σύμφωνα με το πρότυπο ANSI C37.42, 1969 [7]

1.2.2.3 Διακόπτες Φορτίου

Διακόπτες φορτίου ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος καθώς επίσης και να αποκαθιστούν αλλά όχι να διακόπτουν εντάσεις ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Υπάρχουν διακόπτες φορτίου που διαθέτουν ορατό σύστημα επαφών για να ελέγχεται η κατάσταση λειτουργίας τους και άλλοι κλειστού τύπου, στους οποίους όμως πρέπει να προτάσσεται αποζεύκτης προς την πλευρά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και να φέρουν αλληλομανδάλωση.

Κατά την στιγμή της ενεργοποίησης του διακόπτη φορτίου δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των επαφών του. Η σβέση του ηλεκτρικού αυτού τόξου γίνεται μέσα στον ειδικό θάλαμο που δημιουργείται εσωτερικά στο σύστημα μονωτήρων των ακίνητων επαφών του. Ο χειρισμός του διακόπτη φορτίου γίνεται είτε χειροκίνητα με ειδικό σύστημα μοχλού μεγάλου μήκους για τις περιπτώσεις που αυτοί είναι υπαίθριοι και τοποθετούνται σε στύλους είτε με κινητήρα ενσωματωμένο στην διάταξη του.[8]

Σημειώνεται ότι στο ελληνικό εναέριο δίκτυο έχουν τοποθετηθεί τηλεχειριζόμενοι διακόπτες φορτίου προκειμένου η απομόνωσή τους να γίνεται από απόσταση. Ένας τριπολικός μη τηλεχειριζόμενος διακόπτης φορτίου εξωτερικού χώρου με μέσο διακοπής λάδι και με χειριστήριο στη βάση του στύλου, φαίνεται στην εικόνα 6. Αντίστοιχα ένας τηλεχειριζόμενος τριπολικός διακόπτης φορτίου εξωτερικού χώρου με μέσο μόνωσης και διακοπής το SF6 φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 6: Μη τηλεχειριζόμενος τριπολικός διακόπτης φορτίου ελαίου εξωτερικού χώρου



Εικόνα 7: Τηλεχειριζόμενος τριπολικός διακόπτης φορτίου SF6 εξωτερικού χώρου

Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός διακόπτη φορτίου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ονομαστική τάση (U_N)	Η μέγιστη τάση στην οποία απενεργοποιείται ο διακόπτης	24 kV
Ονομαστική ένταση (I_N)	Η ένταση του ρεύματος που επιτρέπεται να διέρχεται συνεχώς από τις επαφές του διακόπτη	630A
Ένταση ρεύματος ζεύξης (I_z)	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα αμέσως μετά την ζεύξη του κυκλώματος	32kA
Ένταση θερμικής αντοχής (I_{th})	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που αντέχει ο διακόπτης για 1s.	12.5kA
Ηλεκτροδυναμική αντοχή (I_{dyn})	Η μέγιστη ένταση του ρεύματος που αντέχει δυναμικά ο διακόπτης	32kA

Πίνακας 1.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη διακόπτη φορτίου[8]

1.2.2.4 Διακόπτες απομόνωσης (ΔA) (Sectionalizer)

Ο ΔA είναι διακόπτης φορτίου με προστασία υπερέντασης, συνεργάζεται με το προηγούμενο προς την πλευρά της πηγής μέσω προστασίας και έχει την ικανότητα κλεισίματος με σφάλμα (making capacity). Οι ΔA λειτουργούν σε σφάλματα που συμβαίνουν σε διακλαδώσεις δικτύων. Διεγείρονται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και από τους κύκλους λειτουργίας του ΔI στην αναχώρηση της γραμμής. Μετράνε με εσωτερικό μηχανισμό, τους κύκλους λειτουργίας αμέσως μόλις περάσει από αυτούς το ρεύμα βραχυκυκλώματος. Στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, αφού ανοίξει ο διακόπτης ισχύος. Στην συνέχεια ο διακόπτης ισχύος κλείνει και μένει κλειστός ενώ ο ΔA μένει ανοικτός.

Οι ηλεκτρονικοί ΔA διαθέτουν πίνακα ελέγχου. Τόσο οι μονοπολικοί με υδραυλικό μηχανισμό ΔA , όσο και οι ηλεκτρονικοί τριπολικοί ΔA , ρυθμίζονται σε μία λειτουργία λιγότερη από αυτές του προτεταμένου μέσου προστασίας. Όταν τα φορτία των διακλαδώσεων ήταν σχετικά μικρά, χρησιμοποιούντο ως επί το πλείστον μονοπολικοί ΔA ονομαστικής συνεχούς έντασης λειτουργίας 35, 50 και 70 A για την προστασία των διακλαδώσεων MT. Αργότερα χρησιμοποιούντο μονοπολικοί ΔA 50 A και 70 A και τέλος με την αύξηση των φορτίων και την αποφυγή των μειονεκτημάτων της μονοπολικής απόζευξης

(π.χ. μη ταυτόχρονο άνοιγμα και των τριών φάσεων, ρεύματα βραχυκύκλωσης από επιστροφή μέσω των μετασχηματιστών διανομής, θανατηφόρα ατυχήματα κ.λπ.), επιλέχτηκε η τριπολική απόζευξη και κατά συνέπεια οι τριπολικοί ΔΑ ονομαστικής έντασης 200 Α και 400 Α, με βάση με τη σχετική τεχνική περιγραφή. Πλεονέκτημα των ΔΑ έναντι των ασφαλειών είναι ότι δεν χρειάζονται αλλαγή και έχουν πλήρη συνεργασία με τον διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση. Η επανάζευξή τους γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα αφού πρώτα βέβαια αποκατασταθεί το σφάλμα από συνεργείο της ΔΕΗ.[9]



Εικόνα 8: ΔΑ με μόνωση και διακοπή σε SF6, προστασίας διακλάδωσης ($I_{max} > 30A$) . Λειτουργεί σε συνεργασία με τον ΔΙ της αναχώρησης ή τον ΔΑΕ και ανοίγει μετά από απαρίθμηση των λειτουργιών του προηγούμενου μέσου προστασίας (ΔΙ ή ΔΑΕ). Ο χειρισμός του μπορεί να γίνει είτε τοπικά είτε εξ'αποστάσεως μέσω ενός κέντρου ελέγχου.

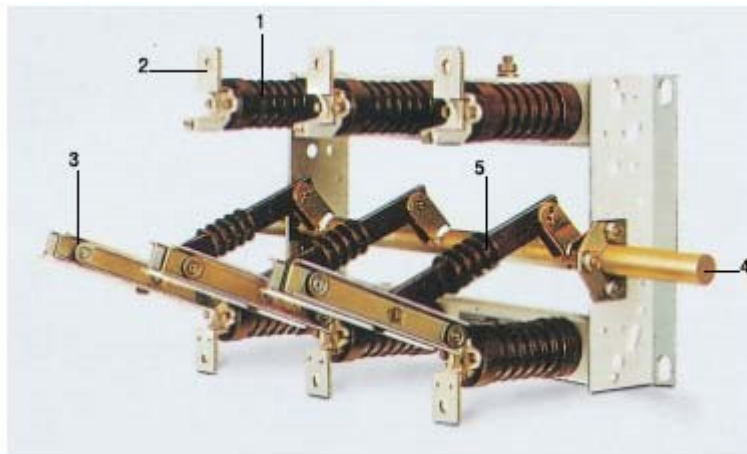
1.2.2.5 Αποζεύκτες

Ένα μέσο ζεύξεως της Μ.Τ. είναι οι αποζεύκτες. Οι αποζεύκτες και γειωτές είναι διακόπτες που ανοίγουν ένα κύκλωμα υπό ελάχιστο φορτίο και με ελάχιστη τάση. Δηλαδή πρέπει να τους χειριζόμαστε χωρίς ρεύμα ή τάση στους πόλους του. Γι' αυτό ονομάζονται και διακόπτες χωρίς φορτίο (off-load switch).

Χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ορατές διακοπές στα κυκλώματα μέσης τάσης. Έτσι είμαστε σίγουροι ότι το κύκλωμα είναι απομονωμένο και μπορούμε να αρχίσουμε τις εργασίες σε αυτό. Γι' αυτό ονομάζονται και απομονωτές (isolator switch). Επίσης χρησιμοποιούνται για να γειώσουμε ένα κύκλωμα.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 9, ο αποζεύκτης αποτελείται από:

1. δύο μονωτήρες σε κάθε πόλο
2. τους ακροδέκτες σύνδεσης στην κορυφή των μονωτήρων
3. τις κινητές επαφές που μοιάζουν με μαχαίρια
4. το σιδερένιο άξονα που με την περιστροφή του δίνει κίνηση στα μαχαίρια
5. ράβδους από μονωτικό υλικό που συνδέουν τον άξονα με τα μαχαίρια



Εικόνα 9: Αποζεύκτης

Οι αποζεύκτες πρέπει να αντέχουν:

- σε κλειστή θέση τα ρεύματα σφαλμάτων
- σε ανοικτή θέση τις υπερτάσεις του δικτύου

Οι γειωτές (earthing switch) είναι πρακτικά αποζεύκτες με τη διαφορά ότι η μια τους πλευρά συνδέεται πάντα στη γείωση. Χρησιμοποιούνται:

- για να μηδενίσουν τα ηλεκτρικά φορτία που παραμένουν στα κυκλώματα μέσης τάσης και οφείλονται στους παρασιτικούς πυκνωτές που υπάρχουν κυρίως στα καλώδια,
- για να γειώσουν το τμήμα του δικτύου στο οποίο θα εργαστούμε (συντήρηση ή επιδιόρθωση).

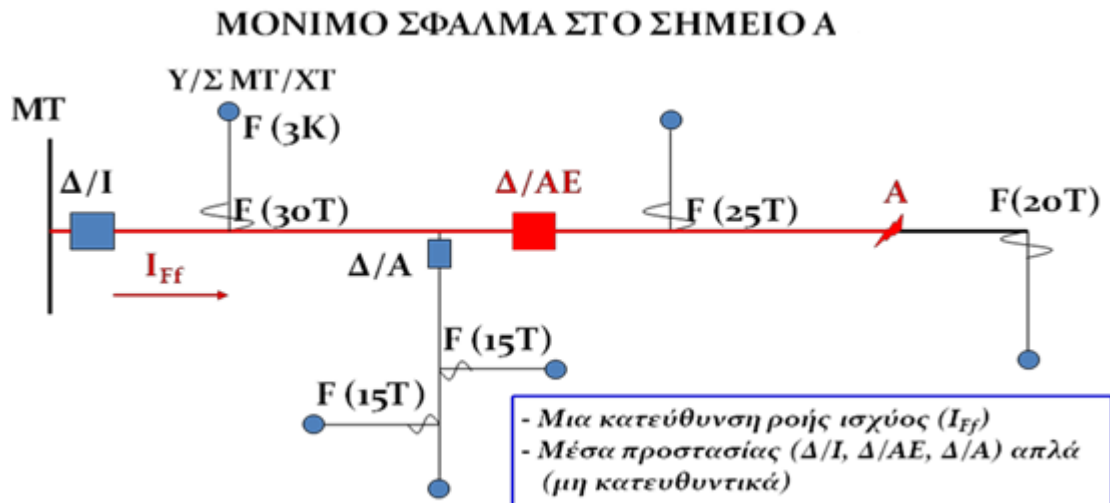
Σήμερα, επειδή η διαφορά τιμής είναι μικρή, χρησιμοποιούμε διακόπτες φορτίου αντί αποζευκτών. Έτσι απλοποιούνται οι χειρισμοί-μανδαλώσεις για την απομόνωση ενός κυκλώματος.

1.2.2.6 Επιλεκτική συνεργασία

Μια από τις βασικές απαιτήσεις της προστασίας ενός Μ/Σ είναι η επιλεκτική συνεργασία μεταξύ των ασφαλειών στην πλευρά της μέσης τάσης και του διακόπτη ισχύος ή των ασφαλειών στην πλευρά της χαμηλής τάσης. Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου των μέσων προστασίας πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται μια επιλεκτική προστασία. Με τον όρο επιλεκτική συνεργασία εννοούμε ότι το όργανο προστασίας που είναι πλησιέστερο στο σφάλμα πρέπει να διακόπτει πρώτο. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα (βραχυκύκλωμα) γίνει στην πλευρά της χαμηλής τάσης του Μ/Σ πρέπει να ανοίγει μόνο ο διακόπτης ισχύος της χαμηλής τάσης, ενώ οι ασφάλειες της ΜΤ πρέπει να μένουν ανεπηρέαστες. Δηλαδή για να διακόψει ένα μέσο γρηγορότερα από ένα άλλο, εφόσον διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα πρέπει ο χρόνος αντίδρασης του πρώτου να είναι μικρότερος από το χρόνο του δεύτερου. Η επιλεκτική προστασία πρέπει να εξασφαλίζεται σε όλη την αλυσίδα των μέσων προστασίας από τη ΧΤ των 400V έως και το ΔΙ αναχώρησης της γραμμής ΜΤ. Η επιλεκτική συνεργασία πρέπει να υπάρχει σε όλα τα σφάλματα δηλαδή τόσο σε σφάλματα γης όσο και φάσεων. Έτσι σε μέσα προστασίας που δεν κάνουν διάκριση μεταξύ σφαλμάτων γης και φάσεων πρέπει τα ρεύματα διέγερσης των μέσων να συνεργάζονται επιλεκτικά με τους ηλεκτρονόμους γης της ΔΕΗ. Τέτοια μέσα που δεν κάνουν διάκριση φάσεων-γης είναι οι ασφάλειες και οι διακόπτες με πρωτογενή προστασία(αυτοπροστασία).

1.2.3 Ακτινικό δίκτυο Μ.Τ. με σύνδεση ΑΠΕ (διεσπαρμένη παραγωγή)

Στο σχήμα 1.8 που ακολουθεί φαίνεται μία περίπτωση ξεκαθαρίσματος μόνιμου σφάλματος στο σημείο Α σε εναέριο ακτινικό δίκτυο ΜΤ. Το μέσο προστασίας που απαλείφει το σφάλμα φαίνεται με κόκκινο χρώμα και συνεργάζεται με το προηγούμενο μέσο προστασίας (ΔI).



Σχήμα 1.8: Εναέριο ακτινικό δίκτυο ΜΤ με σφάλμα στο σημείο Α

Όταν δόθηκε άδεια σε ιδιώτες να δημιουργήσουν παραγωγή μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) με οικονομικά κίνητρα, τα μέσα προστασίας παρέμεναν σε λειτουργία ακτινικού δικτύου, αφού η ιδιωτική παραγωγή ήταν πολύ μικρή συγκρινόμενη με την ισχύ που τροφοδοτούσε το δίκτυο. Οι μονάδες των παραγωγών ήταν συνήθως μικρά αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες των 100 ή 250 kW, ή μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους σπάνια ξεπερνούσε τα 2 MW στο δίκτυο διανομής ΜΤ ενός υποσταθμού 150/20-15 kV. Επιπλέον στα απομονωμένα δίκτυα διανομής της νησιωτικής χώρας μπορούσε να εγκατασταθεί βάσει νόμου διεσπαρμένη παραγωγή μέχρι το πολύ 30% της αιχμής φορτίου του προηγούμενου έτους, δεδομένου ότι η μεγάλη αβεβαιότητα της χρησιμοποίησης αιολικών σταθμών μπορούσε να οδηγήσει το απομονωμένο σύστημα των νησιών σε ολική διακοπή (blackout). Μεγάλα αιολικά πάρκα μπορούσαν να συνδεθούν μόνο στους ζυγούς ΜΤ ενός υποσταθμού 150/20-15 kV. Η προστασία του δικτύου διανομής έναντι των μονάδων ιδιωτικής παραγωγής καθορίστηκε από τον αυτόματο διακόπτη ισχύος της διασύνδεσης (ΑΔΔ) με τις ακόλουθες προστασίες:

- Ορίων τάσης ($\pm 10\% U_n$, όπου U_n η ονομαστική τάση) $t = 10$ s
- Ορίων συχνότητας ($\pm 2\% f_n$, όπου f_n η ονομαστική συχνότητα)

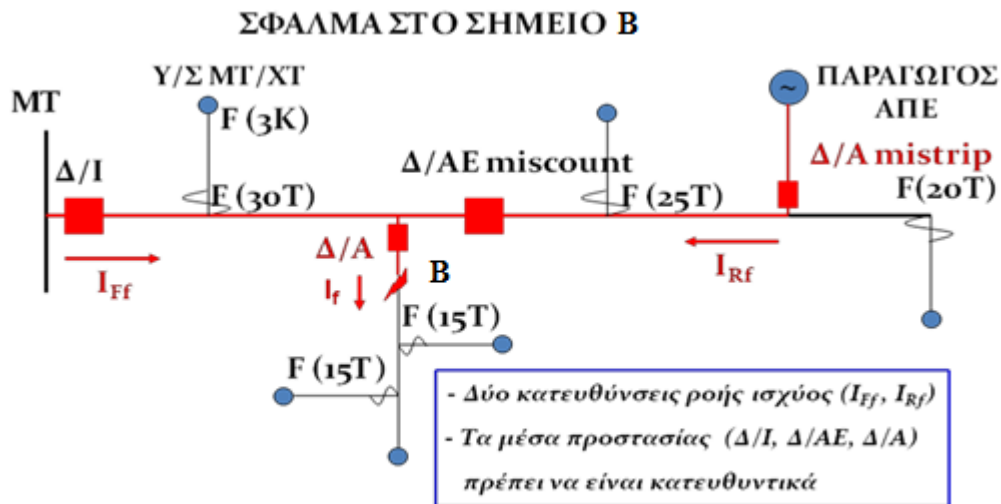
- Ομοπολικής συνιστώσας της τάσης V_0 (0-20 V)

Βασική αρχή είναι το ιδιωτικό σύστημα παραγωγής να απομονωθεί με ασφαλή τρόπο, σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο διανομής και να μην τροφοδοτήσει τμήμα του δικτύου που έχει διακοπεί με ανεξέλεγκτη τάση και συχνότητα (islanding).

Σε περίπτωση μονάδων με σύγχρονες γεννήτριες που μπορούν να τροφοδοτήσουν μόνιμο σφάλμα σε ένα σημείο του δικτύου MT, μελετάται η συνολική ισχύς βραχυκύκλωσης τόσο από το δίκτυο όσο και από τις μονάδες του παραγωγού, η οποία δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη στάθμη βραχυκύκλωσης (7,2 kA, 20 kV, 1s) ή (10 kA, 15 kV, 1s). Επιπλέον τέθηκε προστασία υπερέντασης στον ΑΔΔ σταθερού χρόνου ώστε σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος στη γραμμή διανομής να απομονωθούν πρώτα οι μονάδες του παραγωγού πριν από την προστασία του δικτύου MT.

Με τη πάροδο του χρόνου το δίκτυο των μονάδων ιδιωτικής παραγωγής μεγάλωσε διότι οι παραγωγοί αυξήθηκαν, το κόστος εγκατάστασης μειώθηκε, οι μονάδες των παραγωγών επίσης αύξησαν την ισχύ τους (π.χ. ανεμογεννήτριες ονομ. ισχύος 2, 3 και 5 MW) και επιπλέον αναπτύχθηκε με οικονομικά κίνητρα η παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκά πάρκα. Κατ' αυτόν τον τρόπο το δίκτυο έπαψε πλέον να συμπεριφέρεται ως ακτινικό διότι έχουμε πλέον σημαντική ροή ισχύος και από την ιδιωτική παραγωγή. Έγινε επομένως βροχοειδές και τα κλασικά απλά μέσα προστασίας δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις νέες συνθήκες λειτουργίας.

Ένας κλασικός ΔΑ π.χ. που προστατεύει μια διακλάδωση όπου έχει εγκατασταθεί ένας παραγωγός, εάν δεν είναι κατευθυντικός (directional) μπορεί να οδηγηθεί σε λανθασμένη λειτουργία και θα απομονώσει τη διακλάδωση (mistrip) παρόλο που το σφάλμα είναι σε μια άλλη διακλάδωση, ο δε ΔΑΕ να απαριθμήσει λανθασμένα (miscount), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Εναέριο ακτινικό δίκτυο MT με σύνδεση ΑΠΕ και σφάλμα στο σημείο Β

Τα δίκτυα επομένως διανομής MT αν και έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν ακτινικά, με την είσοδο πλέον στο σύστημα της MT μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με σημαντική διεξόδυση λειτουργούν στην ουσία ως βροχοειδή δίκτυα. Η ανάγκη επομένως αύξησης της αξιοπιστίας του δικτύου MT, οι απαιτήσεις των πελατών, η μείωση του προσωπικού των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού και κυρίως η παράλληλη λειτουργία με το δίκτυο διεσπαρμένης παραγωγής, επιβάλλει τα μέσα προστασίας να είναι κατευθυντικά (directional), αξιόπιστα και μη παθητικά.

1.2.3.1 Πλεονεκτήματα από τη χρήση έξυπνων ΔΑΕ, ΔΑ

1. Οι ΔΑΕ και οι ΔΑ διαθέτουν έξι αισθητήρες τάσης, τρεις από την πλευρά της πηγής και τρεις από την πλευρά του φορτίου, προσδιορίζοντας έτσι την κατεύθυνση της ροής ισχύος (directional).
2. Δεν απαιτείται κεντρικό σύστημα ελέγχου. Λειτουργούν αυτόματα και απομονώνουν το μικρότερο δυνατό τμήμα γραμμής σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος. Επιπλέον μετά την απομόνωση του σφάλματος κλείνει αυτόματα ο διακόπτης τομής ΔΙΤ εξασφαλίζοντας την ηλεκτροδότηση του υπόλοιπου τμήματος.

3. Οι διακόπτες μπορούν να τηλεχειρισθούν, να επικοινωνήσουν με ένα κεντρικό σύστημα και ενσωματώνουν λειτουργίες RTU όπως:
 - Έλεγχος εξ' αποστάσεως (Remote monitoring).
 - Λειτουργία εξ' αποστάσεως (Remote operation).
 - Μέτρηση εξ' αποστάσεως (Remote measurement).
 - Αλλαγή ρυθμίσεων εξ' αποστάσεως (Remote setting change).
4. Μεταβάλλουν τις ρυθμίσεις σύμφωνα με την κατεύθυνση της ισχύος, απομονώνουν ευαίσθητο σφάλμα γης (SEF), ή σφάλμα υψηλής αντίστασης (HRF) και σφάλμα ανοικτού κυκλώματος (π.χ. κομμένος αγωγός).
5. Τα υφιστάμενα μέσα προστασίας (ΔΑΕ, ΔΑ) δεν αποξηλώνονται και συνεχίζουν να λειτουργούν κανονικά σε ακτινικό δίκτυο.
6. Το κόστος προμήθειας των διακοπών προστασίας είναι μικρότερο συγκρινόμενο με το κόστος αγοράς και εγκατάστασης ενός κεντρικού συστήματος.

1.2.4 Μέσα προστασίας και ζεύξεως δικτύου διανομής ΧΤ.

Οι διατάξεις προστασίας έναντι υπερεντάσεων, δηλαδή ρευμάτων υπερφόρτισης και ρευμάτων βραχυκύκλωσης πρέπει:

- Να επιτρέπουν την ροή των παροδικών υπερεντάσεων κατά την κανονική λειτουργία
- Να διακόπτουν την τροφοδότηση πριν η θερμοκρασία του στοιχείου που προστατεύουν υπερβεί την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή
- Να διακόπτουν στο μικρότερο δυνατό χρόνο τα ρεύματα βραχυκύκλωσης
- Να εξασφαλίζουν την διακοπή μόνο του τμήματος του κυκλώματος στο οποίο παρουσιάζεται η υπερένταση

Υπάρχουν τα εξής μέσα προστασίας:

- Ασφάλειες τήξης (ασφαλειοαποζεύκτες)
- Αυτόματοι διακόπτες

1.2.4.1 Ασφάλειες τήξης

Στις ασφάλειες τήξης η διακοπή ενός κυκλώματος προκαλείται από την τήξη ενός χάλκινου ή αργυρού σύρματος ή ταινίας μέσα σε σκόνη χαλαζία. Οι ασφάλειες εισάγουν μετά την τήξη τους μια μεγάλη ωμική αντίσταση στο κύκλωμα, η οποία προκαλεί μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για χαμηλά ρεύματα (<20A) μπορεί να χρησιμοποιούνται χάλκινα σύρματα. Για υψηλότερα ρεύματα έχουμε και αγωγούς (τηκτά) από άργυρο. Αυτό γίνεται για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος στην αντίσταση του τηκτού.

Οι ασφάλειες τήξης εκλέγονται σύμφωνα με τα εξής στοιχεία:

- Ονομαστική τάση π.χ. 230/400V
- Ονομαστική ισχύς διακοπής ή ρεύμα διακοπής (αυτό προσδιορίζει κυρίως τον τύπο της ασφάλειας)
- Χαρακτηριστικές χρόνου-ρεύματος. Μαζί με την χαρακτηριστική μπορεί να δίνονται το 'μικρό' και το 'μεγάλο' ρεύμα δοκιμής. Το μικρό ρεύμα δεν λιώνει την ασφάλεια σε ορισμένο χρόνο, που είναι συνήθως μια ώρα ενώ το μεγάλο ρεύμα λιώνει την ασφάλεια μέσα σε ορισμένο χρόνο συνήθως μιας ώρας

Υπάρχουν οι εξής τύποι ασφαλειών:

- **Ασφάλειες D** (οι μεγάλες βιδωτές). Λέγονται και Diazed-ασφάλειες.
- **Ασφάλειες DO** (οι μικρές βιδωτές). Λέγονται και Neozed-ασφάλειες.
- **Ασφάλειες NH ή HRC-Fuses ή HBC-Fuses**(είναι οι μαχαιρωτές). Οι ασφάλειες αυτές χρησιμοποιούνται για μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης π.χ. 80kA

Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου χωρίζονται σε 5 κατηγορίες:

- FF πολύ ταχείας τήξης, σπάνια χρήση
- F ταχείας τήξης
- M μεσαίας τήξης
- T βραδείας τήξης
- TT πολύ βραδείας τήξης, σπάνια χρήση

Οι διαφορές στις ασφάλειες παρουσιάζονται κυρίως στο μέγεθός τους και στην ισχύ απόξευξής τους (Πίνακας 1.4). Οι ασφάλειες D, DO και NH χρησιμοποιούν σκόνη χαλαζία για τη σβέση του τόξου.

Τύπος	Περιοχή ονομαστικού ρεύματος (A)	Ικανότητα διακοπής σε (kA) υπό $\cos\phi$	Ικανότητα σύμφωνα με κατασκευαστές για 500 V (kA)
D, DO (βιδωτές)	6 - 200	25 0,3	50 – 70
NH 00 (μαχαιρωτές)	6 - 200	50 0,4	80 – 100
NH 0 >>	6 - 160	50 0,4	80 – 100
NH 1 >>	80 - 250	50 0,4	80 – 100
NH 2 >>	125 - 400	50 0,4	80 – 100
NH 3 >>	315 - 630	50 0,4	80 – 100
NH 4 >>	500 - 1000	50 0,4	>100
NH 4a >>	500 - 1250	50 0,4	>100

Πίνακας 1.4: Ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης με διάφορες ασφάλειες [10]

1.2.4.2 Ασφαλειοαποξεύκτες

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες, τύπου ΝΗ, συνδυάζονται σε τριφασικά συστήματα και με μαχαιρωτούς αποξεύκτες, οπότε έχουμε τους λεγόμενους ασφαλειοαποξεύκτες. Έχουν διπλή λειτουργία σε πίνακες διανομής. Χρησιμοποιούνται σαν ασφάλειες και σαν γενικοί διακόπτες στους πίνακες διανομής, γι' αυτό εφαρμόζονται συχνά σε εγκαταστάσεις ισχύος. Γενικά οι ασφαλειοαποξεύκτες μπορούν να κλείνουν ή να ανοίγουν χειροκίνητα υπό φορτίο. Η κίνηση αυτή πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα για να μην διαρκεί πολύ χρόνο το ηλεκτρικό τόξο και επιβαρύνει τις επαφές.

1.2.4.3 Αυτόματοι διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος που ονομάζονται και αυτόματοι, χρησιμοποιούνται για την προστασία σε υπερρεύματα ή και σαν γενικό μέσο ζεύξης, όχι όμως για ζεύξεις και αποζεύξεις φορτίου. Γι' αυτό κατασκευάζονται για λίγους κύκλους λειτουργίας. Οι διακόπτες ισχύος είναι σε θέση να διακόψουν ή να ζεύξουν ένα κύκλωμα σε συνθήκες ομαλής ή ανώμαλης λειτουργίας, δηλαδή και σε βραχυκυκλώματα. Εκτός των επαφών και του θαλάμου σβέσης μπορούν να φέρουν θερμικό και ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο, στοιχείο έλλειψης τάσης, βοηθητικές επαφές σήμανσης και μανδάλωσης, καθώς και στοιχεία καθυστέρησης της πτώσης. Οι διακόπτες ισχύος κατασκευάζονται από 20 Α έως 5000Α.

Οι επαφές ισχύος απομακρύνονται με τη βοήθεια ελατηρίου που πρέπει να οπλιστεί μετά την πτώση του διακόπτη. Ο οπλισμός γίνεται χειροκίνητα με κουμπί, μοχλό ή με κινητήρα, οπότε ο οπλισμός μπορεί να γίνει από μακριά (τηλεχειριζόμενος).

Τα χαρακτηριστικά των διακοπών ισχύος είναι:

- Η τάση
- Το ονομαστικό συνεχώς επιτρεπόμενο ρεύμα
- Το θερμικό ρεύμα του 1s, δηλαδή η αντοχή των επαφών για 1 s
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα απόζευξης, το μέγιστο ρεύμα δηλαδή που μπορεί να αποζεύξει ο διακόπτης ισχύος
- Περιοχή ρύθμισης θερμικού στοιχείου
- Περιοχή ρύθμισης στιγμιαίου (ηλεκτρομαγνητικού) στοιχείου, αν υπάρχει
- Ρελέ έλλειψης τάσης και ρύθμισής του, αν υπάρχει
- Ρελέ υπέρτασης και ρύθμισής του, αν υπάρχει
- Μηχανισμός οπλισμού με κινητήρα, αν υπάρχει
- Βοηθητικές επαφές για σήμανση, μανδάλωση κ.λπ.
- Σύστημα ψύξης επαφών με ανεμιστήρα σε μεγάλους διακόπτες
- Διακόπτες μεγάλης ισχύος μπορεί να απαιτούν βοηθητικές τάσεις που πρέπει να προέρχονται από δίκτυο αδιάλειπτης τάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

“ΕΝΑΕΡΙΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ”

Το εναέριο δίκτυο διανομής αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

1. Αγωγοί, οι οποίοι είναι παρόμοιοι με εκείνους των γραμμών υψηλής τάσης και κατασκευάζονται από αλουμίνιο με ή χωρίς χαλύβδινη ενίσχυση και σε διατομές μικρότερες εκείνων της μεταφοράς.
2. Στύλοι μέσης ή χαμηλής τάσης οι οποίοι κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ή ξύλινοι στύλοι. Πολλές φορές σε ένα στύλο μέσης τάσης συνυπάρχει και γραμμή χαμηλής τάσης.
3. Μονωτήρες, οι οποίοι διακρίνονται σε στηρίξεως και αναρτήσεως.
4. Ηλεκτρονόμοι (υπερέντασης) προστασίας που επενεργούν στους ΔΙ των αναχωρήσεων των γραμμών από Υ/Σ 150/20 kV, καθώς και στους ΔΑΕ και ΔΑ της γραμμής, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.
5. Επίσης ασφάλειες εκτόνωσης ΜΤ που τοποθετούνται στην αρχή των διακλαδώσεων ΜΤ και προστατεύουν τη διακλάδωση.

2.1. Εναέρια Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης

Τα εναέρια δίκτυα ΜΤ έχουν ακτινική μορφή, αποτελούνται δηλαδή από την κύρια γραμμή ΜΤ και τις διακλαδώσεις ΜΤ πάνω στις οποίες συνδέονται οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ. Η κύρια γραμμή κατασκευάζεται συνήθως με αγωγούς μεγαλύτερης διατομής απ' ό,τι οι διακλαδώσεις.

Οι διατομές των εναερίων αγωγών μέσης τάσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στο Ελληνικό δίκτυο είναι οι εξής [11]:

Γυμνοί αγωγοί :

Αγωγοί ACSR 3*16 mm² ,3* 35 mm² , 3*50 mm² , 3*70 mm² , 3*95 mm² (Παλαιότερες διατομές)

Αγωγοί Cu 3*16 mm² , 3*35 mm² , 3* 95 mm²

Συνεστραμμένοι μονωμένοι αγωγοί:

3 x 50 mm² Al + 50 mm² St

3 x 150 mm² Al + 50 mm² St

2.2 Εναέρια Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης

Στις γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται γυμνά χάλκινα σύρματα και σπάνια αλουμίνιο, χωρίς εσωτερική χαλύβδινη ψυχή. Αποτελούνται από τρεις φάσεις και έναν ουδέτερο. Ο πέμπτος αγωγός, είναι ο αγωγός δημοτικού φωτισμού.

Οι διατομές των εναερίων αγωγών χαμηλής τάσης που έχουν τυποποιηθεί στο Ελληνικό δίκτυο είναι οι εξής[11]:

Γυμνοί αγωγοί :

Αγωγοί AL 4*16 mm² ,4*35 mm² ,4* 50 mm² ,4* 70 mm² (Παλαιότερη διατομή)

Αγωγοί Cu 4*16 mm² , 4*35 mm² , 4* 50 mm²

Συνεστραμμένοι μονωμένοι αγωγοί:

3 x 35 mm² Al + 54,6 mm² AAAC + 25 mm² Al (Παλαιότερη διατομή)

3 x 70 mm² Al + 54,6 mm² AAAC + 25 mm² Al

Συνεστραμμένοι αυτοφερόμενοι μονωμένοι αγωγοί:

4*70 mm² Al + 25 mm² Al

4*120 mm² Al + 25 mm² Al

Οι στύλοι είναι ξύλινοι ή τσιμεντένιοι με μικρότερες διαστάσεις από εκείνους της μέσης τάσης. Μπορεί να βρίσκονται και σχετικά κοντά στις κατοικίες, τις οποίες άλλωστε τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια, αφού η τάση τους είναι χαμηλή. Οι μονωτήρες των γραμμών αυτών είναι μικρότεροι εκείνων της μέσης τάσης, αλλά έχουν την ίδια μορφή και κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί.

2.3 Αγωγοί εναέριων δικτύων

Για λόγους μηχανικής αντοχής αλλά και ευκαμψίας, οι αγωγοί των εναέριων δικτύων (overhead lines) δεν είναι συμπαγείς (μονόκλωνοι αγωγοί), αλλά αποτελούνται από κλώνους (stranded conductors), παίρνοντας τη μορφή συρματόσχοινου. Στους συγκεκριμένους τύπους αγωγών, υπάρχει ένας κεντρικός κλώνος και γύρω από αυτόν, αναπτύσσονται διαδοχικές στρώσεις (layers) κλώνων.



Εικόνα 10:Μορφή αγωγού από κλώνους (μία στρώση)

Για την καλύτερη συγκράτηση μεταξύ των κλώνων αλλά και τον περιορισμό των μετατοπίσεων τους κατά την κάμψη των καλωδίων, οι στρώσεις των κλώνων συστρέφονται ελικοειδώς και επιπλέον δύο διαδοχικές στρώσεις έχουν αντίθετη φορά περιστροφής.

Το πλήθος των κλώνων, είναι πολλαπλάσιο του 6 συν 1 και δίνεται από τη σχέση:

$$k = 1 + 6n + 6(n-1) + 6(n-2) + \dots = 1 + 3n(n+1) \quad (2.1)$$

Σύμφωνα λοιπόν με τη σχέση (2.1), ο αγωγός μιας στρώσης περιέχει επτά κλώνους, ο

αγωγός δύο στρώσεων 19 κλώνους, κ.ο.κ.,

Εάν d η διάμετρος του κάθε κλώνου, η διάμετρος και η διατομή του αγωγού

αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις:

$$D = d (2n + 1)$$

Και

$$S = k * s = k * \frac{\pi d^2}{4}$$

Προφανώς, λόγω των κενών αέρος που παρεμβάλλονται μεταξύ των κλώνων, ισχύει ότι:

$$S = k * \frac{\pi d^2}{4} < \frac{\pi D^2}{4}$$

Οι κυριότερες φυσικές και τεχνικο-οικονομικές παράμετροι, που καθορίζουν την ποιότητα και την καταλληλότητα ενός αγωγίμου υλικού για τη χρησιμοποίηση του στις διάφορες ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές, είναι:

- Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ή η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Το ειδικό βάρος
- Ο θερμικός συντελεστής
- Η μηχανική αντοχή σε εφελκυσμό (όριο θραύσης)
- Η αντοχή στη διάβρωση
- Η εξάρτηση των φυσικών παραμέτρων από τους εξωτερικούς παράγοντες
- Η ευκολία κατεργασίας και μορφοποίησης
- Το οικονομικό κόστος
- Η διαθεσιμότητα

Οι αγωγοί των εναέριων δικτύων είναι χωρίς μόνωση και κατασκευάζονται συνήθως από καθαρό χαλκό (copper), κράματα χαλκού, καθαρό αλουμίνιο (aluminium), κράματα αλουμινίου, αλουμίνιο με πυρήνα ή ψυχή από χάλυβα (steel cored aluminium) και από επικασσιτερωμένο χάλυβα (galvanized steel). Με βάση τα όσα προαναφέραμε, η επιλογή του καταλληλότερου αγωγίμου υλικού εξαρτάται από, το οικονομικό κόστος και τις απαιτούμενες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού που καθορίζονται κυρίως, από το μήκος και τα χαρακτηριστικά της μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής, τις αποστάσεις μεταξύ των πυλώνων, τη μορφολογία του εδάφους και τις κατά τόπους επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

2.3.1 Αγωγοί από χαλκό

Ο χαλκός παρουσιάζει τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση από όλα τα μέταλλα, εκτός από τα ευγενή (άργυρος, χρυσός, λευκόχρυσος, παλλάδιο). Για λόγους μηχανικής αντοχής, οι αγωγοί από χαλκό παρότι μειώνεται λίγο η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, κατεργάζονται εν ψυχρώ, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Μερικά από τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά του χαλκού, είναι:

- Ειδική αντίσταση, $\rho = 1.72 * 10^{-8} (\Omega m)$
- Ειδική αγωγιμότητα, $\sigma = 58 * 10^6 (\Omega m)^{-1}$
- Θερμικός συντελεστής, $\alpha = 4.29 * 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1}$
- Ειδικό βάρος, $g = 8.93 (kg/cm^3)$
- Σημείο τήξης, $1083 (^{\circ}C)$
- Όριο θραύσης, $45 * 10^7 (N/m^2)$

Επιπλέον, οι αγωγοί από χαλκό είναι πολύ ανθεκτικοί στη διάβρωση. Όταν εκτεθούν στο περιβάλλον, σχηματίζεται στην επιφάνεια τους ένα λεπτό στρώμα από οξείδιο του χαλκού (CuO), το οποίο απομονώνει το μέταλλο από το διαβρωτικό περιβάλλον αυξάνοντας την αντίσταση του στη διάβρωση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε δίκτυα που βρίσκονται πολύ κοντά στη θάλασσα. Λόγω της χαμηλής τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, έχουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος και κατά συνέπεια η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη των εναέριων αγωγών. Το γεγονός αυτό, έχει δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι, απαιτείται μικρότερη διατομή αγωγών (sectional area) και το δεύτερο η επιφάνεια του αγωγού που εκτίθεται στα έντονα καιρικά φορτία ανέμου και παγετού, είναι

περιορισμένη. Επιπλέον, σαν μέταλλο είναι αρκετά ομοιογενές και έχει μεγάλη υπολειμματική αξία (scrap value). Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι, ο χαλκός αποτελεί το ιδανικότερο υλικό για την κατασκευή όχι μόνο των εναέριων αγωγών αλλά και των πάσης φύσης καλωδίων, για τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, όμως το υψηλό κόστος και η χαμηλή διαθεσιμότητα, έχουν περιορίσει σημαντικά τη χρήση του.

2.3.2 Αγωγοί από αλουμίνιο

Οι αγωγοί αλουμινίου (AAC- All Aluminium Conductor) κατασκευάζονται από καθαρό αλουμίνιο (99,9%), το οποίο είναι γνωστό και ως αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας (E-A1). Μερικά από τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά του αλουμινίου, είναι:

- Ειδική αντίσταση, $\rho = 2.83 * 10^{-8} (\Omega m)$
- Ειδική αγωγιμότητα, $\sigma = 35.34 * 10^6 (\Omega m)^{-1}$
- Θερμικός συντελεστής, $\alpha = 4.29 * 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1}$
- Ειδικό βάρος, $g=2.69 (kg/cm^3)$
- Σημείο τήξης, $658 (^{\circ}C)$
- Όριο θραύσης, $10 * 10^7 (N/m^2)$

Σε σύγκριση με το χαλκό, το αλουμίνιο είναι κατά 30.12% ελαφρύτερο και το γεγονός αυτό αποτελεί και το σημαντικό του πλεονέκτημα, ενώ η ειδική του αγωγιμότητα είναι κατά 60.93% μεγαλύτερη. Αν και η ειδική αγωγιμότητα του χαλκού είναι μεγαλύτερη, η κατά βάρος αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι κατά 202.27% μεγαλύτερη. Η μικρότερη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου σημαίνει ότι, για συγκεκριμένη ποσότητα μεταφερόμενης ενέργειας, η διατομή του αλουμινίου είναι μεγαλύτερη έναντι του χαλκού. Για την ίδια ωμική αντίσταση, θα πρέπει η διατομή του αγωγού του αλουμινίου να είναι κατά 1.26 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του χαλκού. Η ανάγκη για μεγαλύτερη διατομή αποτελεί μειονέκτημα, καθότι σημαίνει μεγαλύτερη έκθεση των αγωγών στις πιέσεις των ανέμων και στο πρόσθετο βάρος λόγω παγετού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων εγκάρσιων δυνάμεων.

Λόγω της μικρότερης αντοχής σε εφελκυσμό και του μεγαλύτερου συντελεστή γραμμικής διαστολής, το βέλος κάμψης (sag) των αγωγών αλουμινίου είναι μεγαλύτερο από εκείνο των αγωγών από χαλκό και το γεγονός αυτό επιβάλλει τη χρήση πυλώνων στήριξης μεγαλύτερου ύψους. Από την άλλη πλευρά, το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι περίπου το 30% του χαλκού, με αποτέλεσμα το βάρος του ισοδύναμου αγωγού αλουμινίου να είναι κατά 50% μικρότερο από το αντίστοιχο του χαλκού. Επομένως όλες οι διατάξεις στήριξης, δεν χρειάζεται να είναι τόσο ενισχυμένες όπως στην περίπτωση του χαλκού. Σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι αγωγοί αλουμινίου υφίστανται μια μικρή επιφανειακή οξείδωση αλουμίνιας (Al_2O_3), η οποία όμως δρα προστατευτικά έναντι της περαιτέρω οξείδωσης. Σε αντίθεση με τους αγωγούς του χαλκού, οι αγωγοί αλουμινίου δεν επιτρέπεται να τοποθετούνται σε δίκτυα διανομής σε κοντινές αποστάσεις από τη θάλασσα, διότι υφίστανται έντονη διάβρωση λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης του άλατος στον αέρα, η οποία μπορεί να διεισδύσει σε βάθος έως και τα 3 mm.

Όσον αφορά στις απώλειες Corona (ιδιαίτερα για τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης), λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου των αγωγών αλουμινίου, είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των αγωγών από χαλκό. Το μικρότερο βάρος, το σημαντικά χαμηλότερο κόστος και η μεγάλη διαθεσιμότητα, είναι οι παράγοντες που συνέβαλλαν καθοριστικά στη συντριπτική πλειοψηφία χρησιμοποίησης του αλουμινίου έναντι του χαλκού, στην κατασκευή των αγωγών των γραμμών μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3.3 Αγωγοί από κράμα αλουμινίου

Οι αγωγοί της κατηγορίας αυτής (AAAC- All Aluminium Alloy Conductor) αποτελούν κράμα με περιεκτικότητα περίπου, 98.8% αλουμίνιο, 0.4% Mg, 0.5% Si και 0.3% Fe. Μερικά από τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά του κράματος αλουμινίου, είναι:

- Ειδική αντίσταση, $\rho = 3.26 * 10^{-8} (\Omega m)$
- Ειδική αγωγιμότητα, $\sigma = 30.67 * 10^6 (\Omega m)^{-1}$
- Θερμικός συντελεστής, $\alpha = 4.29 * 10^{-3} (^{\circ}C)$
- Ειδικό βάρος, $g = 2.70(kg/ cm^3)$
- Σημείο τήξης, 658 ($^{\circ}C$)

- Όριο θραύσης, $310 \cdot 10^7$ (N/m²)

2.3.4 Αγωγοί από αλουμίνιο με χαλύβδινη ψυχή

Λόγω της μικρής αντοχής σε εφελκυσμό, τα βέλη κάμψης των αγωγών αλουμινίου είναι μεγάλα και το γεγονός αυτό, κάνει απαγορευτική τη χρήση τους σε γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους, που απαιτούν πυλώνες με μεγάλα ανοίγματα. Για την αύξηση της μηχανικής του αντοχής, ο αγωγός αλουμινίου ενισχύεται στο εσωτερικό του με κλώνους από γαλβανισμένο χάλυβα. Ο σύνθετος αγωγός που προκύπτει, είναι γνωστός ως αγωγός αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή ACSR ή Al/St (Aluminium Coated Steel Reinforced). Στην περίπτωση αυτή, ο πυρήνας(ψυχή) του αγωγού αναλαμβάνει τη μηχανική φόρτιση ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη μηχανική αντοχή, ενώ οι κλώνοι αλουμινίου που περιβάλλουν τον πυρήνα χρησιμεύουν για τη διοχέτευση του ρεύματος.



Εικόνα 11: Εναέριοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή.

Αντιπροσωπευτικές τιμές των βασικών φυσικών χαρακτηριστικών του

γαλβανισμένου χάλυβα, είναι:

- Ειδική αντίσταση, $\rho = 74.5 \cdot 10^8$ (Ωm)
- Ειδική αγωγιμότητα, $\sigma = 1.34 \cdot 10^6$ (Ωm)⁻¹
- Θερμικός συντελεστής, $\alpha = 4.29 \cdot 10^{-3}$ ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹
- Ειδικό βάρος, $g = 7.9$ (kg/cm³)
- Σημείο τήξης, 1493 ($^{\circ}\text{C}$)
- Όριο θραύσης, $310 \cdot 10^7$ (N/m²)

Οι ACSR αγωγοί, για την ίδια επιτρεπόμενη ένταση έχουν μεγαλύτερη διατομή από τους αγωγούς χαλκού και αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, όσον αφορά στις απώλειες Corona (ιδιαίτερα για τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης).

2.3.5 Αγωγοί από γαλβανισμένο χάλυβα

Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης μηχανικής αντοχής του σε σχέση με τους υπόλοιπους μεταλλικούς αγωγούς, ο γαλβανισμένος χάλυβας χρησιμοποιείται ως εναέριος αγωγός γραμμών διανομής σε ειδικές περιπτώσεις όπως, γραμμών με πολύ μεγάλα ανοίγματα μεταξύ των πυλώνων ή και σε γραμμές που υπόκεινται σε σημαντικές καταπονήσεις λόγω των κλιματικών συνθηκών. Επειδή ως αγωγίμο υλικό παρουσιάζει πολύ μικρή τιμή στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η χρήση του περιορίζεται σε γραμμές διανομής με χαμηλή ροή ισχύος. Χρησιμοποιείται όμως ευρέως ως αγωγός γης. Οι αγωγοί γης, υπό κανονικές συνθήκες δεν διαρρέονται από ρεύματα. Διαρρέονται από ρεύματα βιομηχανικής συχνότητας, κατά τη διάρκεια ασύμμετρων (μονοφασικών ή διφασικών) σφαλμάτων ως προς γη και από κρουστικά ρεύματα κατά τη διάρκεια κεραυνικών πληγμάτων. Η χρονική διάρκεια των σφαλματικών ρευμάτων είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα η θερμική ικανότητα φόρτισης των χαλύβδινων αγωγών να επαρκεί πλήρως στα μεγέθη των ρευμάτων αυτών. Στις περιπτώσεις εκείνες που για οποιονδήποτε λόγο απαιτούνται αυξημένες αγωγιμότητες αγωγών γης, χρησιμοποιούνται αγωγοί αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ						
A/A	Είδος αγωγού	Αριθμός κλώνων N	Δκλώνων (mm)	Πραγματική διατομή A (mm ²)	Βάρος αγωγού Kg/m	Φορτίο θραύσης Kg
1	ACSR ισοδύναμος με Cu16mm ² (μόνο για MT)	6Al 1 St	2,32 2,32	2 6	0.102	950
2	ACSR ισοδύναμος με Cu35mm ² (μόνο για MT)	6Al 1 St	3,44 3,44	5 8	0.224	2000
3	ACSR ισοδύναμος με Cu50mm ² (μόνο για MT)	6Al 1 St	4,11 4,11	8 2	0.321	2800
4	ACSR ισοδύναμος με Cu70mm ² (μόνο για MT)	26Al 7 St	2,33 1,81	115		
5	ACSR ισοδύναμος με Cu95mm ² (μόνο για MT)	26Al 7 St	2,72 2,12	156	0.609	5650
6	Cu16mm ² (για XT&MT)	7	1,71	1 6	0.144	739
7	Cu35mm ² (για XT&MT)	7	2,35	3 0	0.315	1566
8	Cu50mm ² (για XT&MT)	19	1,83	5 0	0.453	2299
9	Cu70mm ² (για XT&MT)	19	2,17	7 0	0.634	3162
10	Cu95mm ² (για XT&MT)	19	2,52	9 5		
11	Al ισοδύναμος με Cu16mm ² (μόνο για XT)	7	2,21	2 7	0.074	470
12	Al ισοδύναμος με Cu35mm ² (μόνο για XT)	7	3,22	5 7	0.158	940
13	Al ισοδύναμος με Cu50mm ² (μόνο για XT)	19	2,35	8 2	0.229	1442
14	Al ισοδύναμος με Cu70mm ² (μόνο για XT)	19	2,78	115	0.320	2018

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά εναερίων αγωγών

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ενδεικτικά ο τρόπος υπολογισμού της πραγματικής διατομής για ένα είδος αγωγού (π.χ. ACSR – 95). Λόγω του επιδερμικού φαινομένου, το βάθος διείσδυσης δ για το αλουμίνιο είναι 12,3 mm και για το ατσάλι 1,8 mm [2,22]. Συνεπώς, στον αγωγό ACSR 95 mm² γίνεται πλήρης εκμετάλλευση τόσο των κλώνων Al όσο και των κλώνων St.

Η διατομή του κλώνου Al είναι :

$$A_{Al} = \pi * \frac{2.72^2}{4} = 5,81mm^2$$

Η διατομή του κλώνου St είναι :

$$A_{St} = \pi * \frac{2.12^2}{4} = 3,53mm^2$$

Η διατομή του κλώνου St μετατρέπεται σε ισοδύναμη διατομή αλουμινίου :

$$A_{Al} = A_{St} * \frac{\rho_{Al}}{\rho_{St}} = 3.53 * \frac{0.03}{0.15} = 0,71mm^2$$

Επομένως, η πραγματική διατομή του αγωγού ACSR – 95 θα είναι :

$$A = 26 \cdot 5,81 + 7 \cdot 0,71 = 156 mm^2$$

2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναερίων αγωγών.

2.4.1 Ωμική και επαγωγική αντίσταση

Η ωμική αντίσταση R (Ω/km) ενός αγωγού σε μια θερμοκρασία θ , εξαρτάται από την αντίσταση R₂₀ του αγωγού στη θερμοκρασία των 20 °C και από το θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης α₂₀. Δίνεται από τον τύπο :

$$R = R_{20} * (1 + \alpha_{20} * (\theta - 20)) \text{ όπου :} \quad (2.1)$$

$$R_{20} = \rho_{20} / A$$

όταν ρ₂₀ είναι η ειδική αντίσταση και A η πραγματική διατομή του αγωγού (mm²) .

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης α₂₀ και η ειδική αντίσταση ρ₂₀ για τους αγωγούς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δίνονται από τον πίνακα :

Μέγεθος (συμβολισμός)	Μονάδα	Cu	Al	St
Θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης(α_{20})	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00393	0,00403	0,0045
Ειδική αντίσταση στους 20 $^{\circ}\text{C}$ (ρ_{20})	$\Omega\text{mm}^2/\text{km}$	17,241	28,264	138

Πίνακας 2.2: Τιμές θερμοκρασιακού συντελεστή αντίστασης (α_{20}) και ειδικής αντίστασης στους 20 $^{\circ}\text{C}$ (ρ_{20})[12]

Η αντίσταση R_{20} βασικά είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού και βρίσκεται σε άμεση σχέση με το είδος του υλικού του αγωγού . Ο χαλκός παρουσιάζει τη μικρότερη αντίσταση και είναι το καλύτερο υλικό για τους αγωγούς . Λόγω κόστους χρησιμοποιούμε αλουμίνιο με αντίσταση κατά 64% μεγαλύτερη του χαλκού ή και σύνθετους αγωγούς από σύρματα αλουμινίου και χάλυβα για να πετύχουμε την απαιτούμενη μηχανική αντοχή όπως στον αγωγό ACSR .

Επειδή τα R_0 και α_{20} είναι καθορισμένα για κάθε αγωγό ή καλώδιο, βασικό είναι να καθορίσουμε τη θερμοκρασία λειτουργίας .

Η επαγωγική αντίσταση X (Ω/km)εξαρτάται βασικά από τη διάταξη των αγωγών και την γεωμετρική απόσταση μεταξύ των φάσεων . Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απόσταση τόσο μεγαλύτερη είναι και η επαγωγική αντίσταση, πράγμα που εξηγεί και της μικρές επαγωγικές αντιστάσεις των συνεστραμμένων και υπόγειων καλωδίων .

Δίνεται από τον τύπο : $X=2\pi fL10^{-3}$ όπου $f=50$ Hz και L η μέση αυτεπαγωγή ανά φάση από τον τύπο:

$$L= 0,21*\ln(2s/ad_c)(mH/km),$$

με

$$s = \sqrt[3]{S_{ab} * S_{bc}*S_{ca}}$$

όπου $S_{ab}S_{bc}S_{ca}$ οι αποστάσεις των κέντρων των αντίστοιχων αγωγών, d_c η διάμετρος του αγωγού (mm),
a ο λόγος της μέσης (ισοδύναμης) ακτίνας ενός αγωγού προς την πραγματική ακτίνα και η τιμή του
εξαρτάται από το πλήθος των συρματιδίων

2.4.2 Τιμές ωμικής και επαγωγικής αντίστασης εναέριων αγωγών διανομής

Οι τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των εναέριων δικτύων Μ.Τ. και Χ.Τ. δίνονται ακολούθως στους πίνακες 2.3 και 2.4 αντίστοιχα.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Μ.Τ.(ωμική-επαγωγική αντίσταση)				
Αγωγοί	Ονομαστική διατομή	Πραγματική διατομή	R	X
	mm²	mm²	Ω/km	Ω/km
3*16 ACSR	16	25	1,268	0,422
3*35 ACSR	35	56	0,576	0,397
3*95 ACSR	95	150	0,215	0,334
3*16 CU	16	16	1,274	0,417
3*35 CU	35	35	0,596	0,393
3*95 CU	95	95	0,220	0,358
3*50 AL+50ST	50	50	0,823	0,150
3*150AL+50ST	150	150	0,266	0,125

Πίνακας 2.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Μ.Τ.[12]

Οι επαγωγικές αντιστάσεις έχουν υπολογιστεί με βάση την τυποποιημένη οριζόντια διάταξη των γυμνών αγωγών στην 'κατασκευή ευθυγραμμίας (P-3), όπως περιγράφεται στο Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής της ΔΕΗ.[13]

Στα δε συνεστραμμένα καλώδια οι επαγωγικές αντιστάσεις έχουν υπολογιστεί με βάση τις αποστάσεις των κέντρων των αγωγών. Οι ωμικές αντιστάσεις των γυμνών αγωγών έχουν υπολογιστεί σε θερμοκρασία 50 °C και των συνεστραμμένων καλωδίων στους 90 °C.

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Χ.Τ.(ωμική-επαγωγική αντίσταση)				
Αγωγοί	Ονομ.διατ.	Πραγμ.διατ.	R	X
	mm²	mm²	Ω/km	Ω/km
4*16 AL	16	27	1,218	0,318
4*35 AL	35	57	0,574	0,294
4*50 AL	50	82	0,397	0,279
4*16 CU	16	16	1,274	0,334
4*35 CU	35	35	0,596	0,309
4*50 CU	50	50	0,426	0,294
3*70AL+54,6 AAAC	70	70	0,497	0,100
4*120+25 AL	120	120	0,284	0,083

Πίνακας 2.4 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Χ.Τ.[12]

Οι επαγωγικές αντιστάσεις έχουν υπολογιστεί με βάση την τυποποιημένη κατακόρυφη διάταξη των γυμνών αγωγών στην ‘κατασκευή ευθυγραμμίας’ (S-3), όπως περιγράφεται στο Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής της ΔΕΗ.[13] Στα δε συνεστραμμένα καλώδια οι επαγωγικές αντιστάσεις έχουν υπολογιστεί με βάση τις αποστάσεις των κέντρων των αγωγών. Οι ωμικές αντιστάσεις των γυμνών αγωγών έχουν υπολογιστεί σε θερμοκρασία 50 °C και των συνεστραμμένων καλωδίων στους 90 °C.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των καλωδίων παροχής Χ.Τ. δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ Χ.Τ.						
Τύπος καλωδίου	Ονομαστική διατομή αγωγού φάσης	Ελάχιστος αριθμός συρματιδίων αγωγού φάσης	Μέγιστη αντίσταση αγωγού φάσης στους 20°C	Μέγιστη διάμετρος αγωγού φάσης	Πάχος μόνωσης ERP	Πάχος μανδύα SE₁
	mm²	IEC 228	IEC 228	IEC 228A	IEC 502	IEC 502
			Ω/km	mm	mm	mm
1/φασικό	6	7	3,11	3,3	1	1,4
3/φασικό	6	7	3,11	3,3	1	1,8
1/φασικό	16	7	1,16	5,3	1	1,4
3/φασικό	16	7	1,16	5,3	1	1,8
3/φασικό	25	7	0,734	6,6	1,2	1,8
3/φασικό	35	7	0,529	7,9	1,2	1,8
3/φασικό	30	19	0,391	9,1	1,4	1,8

Πίνακας 2.5: Βασικά χαρακτηριστικά καλωδίων παροχής χαμηλής τάσης.

Σημείωση : Το πάχος της μόνωσης ERP και του μανδύα SE₁ υπολογίστηκαν με βάση το IEC 502/83.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

“ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ”

3.1 Μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις εναερίων αγωγών

3.1.1 Ικανότητα φόρτισης εναερίων αγωγών

Η ικανότητα φόρτισης (current-carrying capacity ή ampacity) ενός αγωγού, καθορίζεται από την επιτρεπόμενη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του αγωγού, τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο απάγεται η θερμότητα των απωλειών και τον τρόπο εγκατάστασης των αγωγών, δηλαδή τις αποστάσεις μεταξύ των αγωγών και τα ανοίγματα μεταξύ των πυλώνων.

Για παράδειγμα, αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες των στοιχείων που συνθέτουν τον αγωγό, λόγω του φαινομένου της βραδείας ανόπτησης που εμφανίζεται στο χαλκό και στο αλουμίνιο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 °C, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας των εναερίων αγωγών περιορίζεται κάτω από τους 100 °C. Επίσης, σε ότι αφορά τη γεωμετρία της γραμμής, το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος κάμψης, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τις αποστάσεις (ανοίγματα) μεταξύ των πυλώνων, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα σε περιπτώσεις γραμμών με μεγάλα ανοίγματα.

Η επιτρεπόμενη μέγιστη θερμοκρασία των καλωδίων περιορίζεται από τη θερμική αντοχή της μόνωσης τους. Η απαγωγή της θερμότητας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αγωγού ή καλωδίου και περιβάλλοντος, και προκειμένου για καλώδια από τη θερμική αντίσταση από τον αγωγό μέχρι το περιβάλλον.

Η υπέρβαση της επιτρεπόμενης φόρτισης (υπερφόρτιση) των καλωδίων μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των χαρακτηριστικών της μόνωσης τους και πρόωρη γήρανση τους. Η υπερφόρτιση των γυμνών αγωγών αντίστοιχα μπορεί να προκαλέσει μείωση της μηχανικής αντοχής τους.

Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει ο αγωγός στην κανονική λειτουργία να έχει φορτίο μεγαλύτερο του επιτρεπόμενου θερμικού ορίου.

3.1.2 Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης αγωγού

Η θερμότητα που αναπτύσσεται σε έναν αγωγό, οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο Joule και σε ένα μικρό ποσοστό στην ηλιακή ακτινοβολία (solar radiation). Οι μηχανισμοί απαγωγής της εκλυόμενης θερμότητας, είναι με μεταφορά (heat transfer) και με ακτινοβολία (heat radiation). Με βάση τα παραπάνω, το ισοζύγιο θερμότητας (heat balance) του αγωγού στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, περιγράφεται από τη σχέση:

$$Q_e + Q_s = Q_c + Q_r$$

Q_e = αναπτυσσόμενη θερμότητα λόγω της ροής ρεύματος, (W / m)

Q_s = αναπτυσσόμενη θερμότητα λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, (W / m)

Q_r = απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (radiant heat losses), (W / m)

Q_c = απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς (convective heat losses), (W / m)

Οι απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, προέρχονται από την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος. Εξαρτώνται άμεσα από τη γεωμετρία του αγωγού και υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Q_r = K_s * K_e * D * \pi (T^4 - T_a^4) \quad (W/m)$$

Όπου

K_s η σταθερά Stefan-Boltzmann για την ακτινοβολία μέλανος σώματος:

$$K_s = 5,6704 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * ^\circ C^4}$$

K_e ο συντελεστής εκπομπής (emission coefficient), καθαρός αριθμός με τιμές κοντά στο 0 για καινούργιους αγωγούς και από 0.5-1 για οξειδωμένους αγωγούς. Τυπική τιμή, κοντά στο 0.6.

D η διάμετρος αγωγού, (m)

T η θερμοκρασία αγωγού, (K)

T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος, (K)

Οι απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Q_c = \pi * \lambda * N_u(T - T_a) \quad (W/m)$$

Όπου $N_u = f/(Re)$ ο αριθμός Nusselt και Re ο αριθμός Reynolds.

Ισχύει ότι:

$$Re = \frac{\nu * D * \gamma}{\eta}$$

Όπου:

ν η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του στον αγωγό (m / s)

γ η πυκνότητα μάζας του αέρα (Kg / m³)

η το δυναμικό ιξώδες του αέρα (Ns/m²)

λ η θερμική αγωγιμότητα του αέρα (W / mK)

Τιμές των μεγεθών γ , λ και η για τον αέρα, για διάφορες θερμοκρασίες, δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Θερμοκρασία(°C)	Πυκνότητα Μάζας (kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Δυναμικό ιξώδες (Ns/m)
0	1.29	0.0243	0.175
10	1.25	0.0250	0.180
20	1.20	0.0257	0.184
30	1.17	0.0265	0.189
40	1.13	0.0272	0.194
50	1.09	0.0280	0.199
60	1.06	0.0287	0.203
70	1.03	0.0294	0.208
80	1.00	0.0301	0.213
90	0.97	0.0309	0.217
100	0.95	0.0316	0.222

Πίνακας 3.1: Τιμές των μεγεθών (γ) πυκνότητα μάζας, (η) δυναμικού ιξώδους και (λ) θερμικής αγωγιμότητας του αέρα.

Ο αριθμός Nusselt, ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας του αέρα, δίνεται από τις σχέσεις:

$$N_u = 0,32 + 0,43 * Re^{0,52} \text{ για χαμηλές ταχύτητες και}$$

$$N_u = 0,24 * Re^{0,6} \text{ για υψηλές ταχύτητες.}$$

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο αγωγός στην επιφάνεια του, μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης της γραμμής και τον προσανατολισμό της και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_s = D * K_a * Q_{SH} \quad (W/m)$$

Όπου

K_a ο συντελεστής απορρόφησης, καθαρός αριθμός με τιμές κοντά στο 0.5

Q_{SH} η τυπική ηλιακή ακτινοβολία, με τιμές 850 -1350 W/m²

Η αναπτυσσόμενη ροή θερμότητας στον αγωγό λόγω των απωλειών Joule, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_e = I_{rms}^2 * R$$

Όπου η ωμική αντίσταση του αγωγού στη θερμοκρασία λειτουργίας του αγωγού δίνεται από τη σχέση (2.1).

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω σχέσεις, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης του αγωγού με βάση τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, θα προκύψει από τη σχέση

$$I_{rms,max} = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R}}$$

Το ρεύμα αυτό αποτελεί το θερμικό όριο φόρτισης του αγωγού, κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, με βάση τις οποίες προσδιορίζονται τα μεγέθη, Q_r , Q_e και Q_s . Προφανώς, το όριο φόρτισης θα είναι διαφορετικό για κάθε εποχή του έτους. Οι δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες για το θερμικό όριο φόρτισης, είναι κατά τη θερινή περίοδο όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα αυξημένη και για χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Τυπικές αντιπροσωπευτικές τιμές για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ταχύτητα του ανέμου για τον ελλαδικό χώρο, είναι $\theta_a = 40^\circ\text{C}$ και $v = 0.6\text{m/s}$ αντίστοιχα.[20]

3.1.3 Τιμές μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος φόρτισης αγωγών.

Στους πίνακες που ακολουθούν, δίνονται μερικά βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εναέριων αγωγών ΜΤ.

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Μ.Τ. (επιτρεπόμενες φορτίσεις αγωγών)									
Αγωγοί	Όνομ. διατ.	Πραγματική διατομή	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση			$Z_1 = Z_2 = R_1 + jX_1$		$Z_0 = R_0 + jX_0$	
			A	MVA (20 kV)	MVA (15 Kv)	R_1 (Ω/km)	X_1 (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)
3*16 ACSR	16	25	136	4,71	3,53	1,268	0,422	1,416	1,620
3*35 ACSR	35	56	224	7,76	5,82	0,576	0,397	0,724	1,595
3*95 ACSR	95	150	448	15,52	11,64	0,215	0,334	0,363	1,556
3*16 CU	16	16	115	3,98	2,99	1,274	0,417	1,422	1,639
3*35 CU	35	35	185	6,41	4,81	0,596	0,393	0,744	1,615
3*95 CU	95	95	352	12,19	9,15	0,220	0,358	0,368	1,580
3*50 AL+50ST	50	50	123	4,26	3,20	0,823	0,150		
3*150AL+50ST	150	150	241	8,35	6,28	0,266	0,125		

Πίνακας 3.2: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Μ.Τ. [13,15]

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε Α έχουν προκύψει με τις εξής παραδοχές:

Θερμοκρασία αέρα 40 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού CU: 70 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού ACSR: 80 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγών συνεστραμμένων καλωδίων : 90 °C

Ταχύτητα αέρα : 0,6 m/s

Οι ωμικές αντιστάσεις των γυμνών αγωγών έχουν υπολογιστεί σε θερμοκρασία 50°C.

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Χ.Τ. (επιτρεπόμενες φορτίσεις αγωγών)						
Αγωγοί	Ονομ.διατ mm ²	Πραγμ.δι ατ. mm ²	Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση		R Ω/km	X Ω/km
			A	Τριφ.ΚVA		
4*16 AL	16	27	145	100	1,218	0,318
4*35 AL	35	57	232	161	0,574	0,294
4*50 AL	50	82	295	204	0,397	0,279
4*16 CU	16	16	115	80	1,274	0,334
4*35 CU	35	35	185	128	0,596	0,309
4*50 CU	50	50	232	161	0,426	0,294
3*70AL+54,6 AAAC	70	70	194	134	0,497	0,100
4*120+25 AL	120	120	280	194	0,284	0,083

Πίνακας 3.3: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά εναέριων δικτύων Χ.Τ. [13,15]

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε Α έχουν προκύψει με τις εξής παραδοχές:

Θερμοκρασία αέρα 40 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού CU: 70 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγού ACSR: 80 °C

Μέγιστη θερμοκρασία αγωγών συνεστραμμένων καλωδίων : 90 °C

Ταχύτητα αέρα : 0,6 m/s

Οι αντιστάσεις των γυμνών αγωγών έχουν υπολογιστεί σε θερμοκρασία 50°C.

Επισημαίνεται ότι το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας μιας γραμμής του ελληνικού δικτύου διανομής προσδιορίζεται από το προτεταγμένο μέσο προστασίας της. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

Γραμμές χαμηλής τάσης που προστατεύονται, μέσω μαχαιρωτών ασφαλειών σε ασφαλειοκιβώτια των υποσταθμών μέσης προς χαμηλή τάση .

Γραμμές μέσης τάσης 20 kV (γραμμές κορμού) που προστατεύονται από αυτόματους διακόπτες (ή διακόπτες ισχύος).

Γραμμές διακλαδώσεων μέσης τάσης που προστατεύονται μέσω ασφαλειοαποξευκτών με τηκτά ονομαστικού ρεύματος (βλέπε παρ. 1.1.1) συνήθως μέχρι 30 A ή από διακόπτες απομόνωσης σε συνεργασία με τους διακόπτες ισχύος.

3.1.4 Ικανότητα υπερφόρτισης αγωγών.

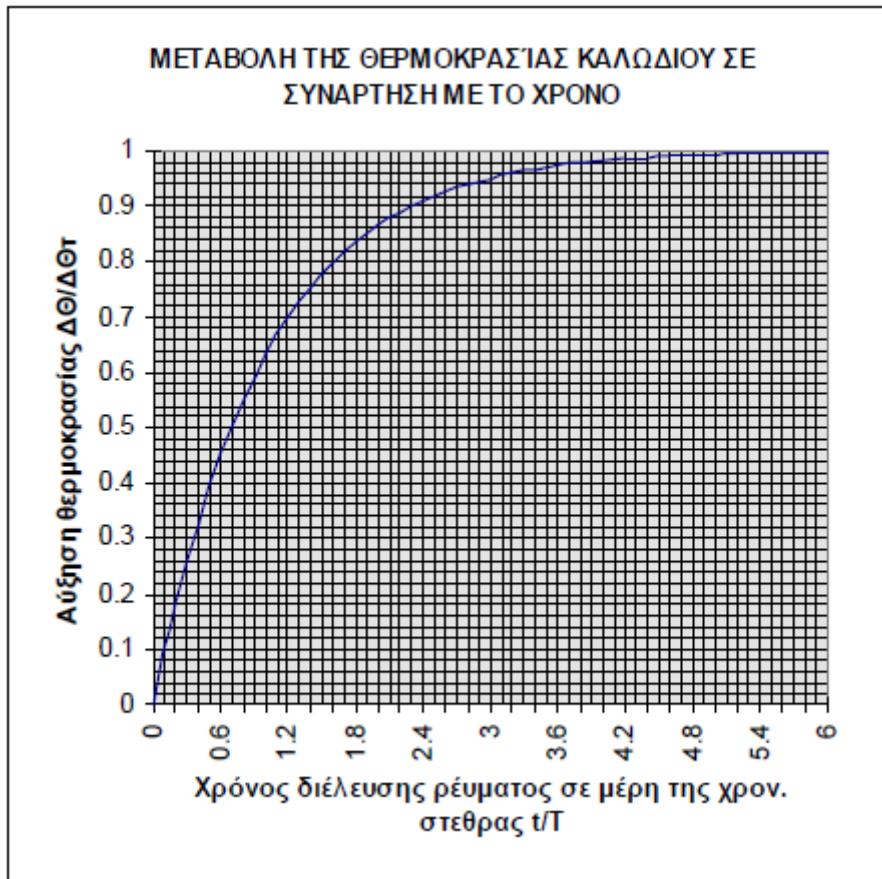
Οι υπερφορτίσεις είναι επιτρεπτές μόνο σε περιπτώσεις που λόγω της μικρής διάρκειας τους η θερμοκρασία του καλωδίου δεν φθάνει στην τελική τιμή που αντιστοιχεί στο ρεύμα υπερφόρτισης, αλλά παραμένει κάτω από τη θερμοκρασία μόνιμης φόρτισης. Υπέρβαση των ορίων θερμοκρασίας μόνιμης φόρτισης γίνεται αποδεκτή μόνο στην περίπτωση των βραχυκυκλωμάτων που οι χρόνοι καταπόνησης των καλωδίων είναι πάρα πολύ μικροί. [14]

Περίοδος θέρμανσης καλωδίου :

Όταν ένα καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασης I επί χρόνο t , η διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος $\Delta\theta$ που θα αποκτήσει μέχρι να φθάσει στην τελική θερμοκρασία που θα έχουμε ισορροπία μεταξύ παραγόμενης θερμότητας απωλειών και της απαγόμενης στο περιβάλλον θερμότητας, δίνεται θεωρητικά από τον τύπο :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_t (1 - e^{-t/T}) \quad (3.1)$$

όπου T είναι η χρονική σταθερά θέρμανσης του καλωδίου και $\Delta\theta_t$ η διαφορά μεταξύ της τελικής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, που απεικονίζεται και στο παρακείμενο διάγραμμα .



Σχήμα 3.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας καλωδίου σε συνάρτηση με το χρόνο

Εύκολα διαπιστώνουμε ότι για να φτάσει ένα καλώδιο στην τελική θερμοκρασία ισορροπίας χρειάζεται θεωρητικά άπειρος χρόνος . Στην πράξη όπως φαίνεται και από το διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι για να φτάσει η θερμοκρασία στο 99% της τελικής χρειάζεται χρόνος $t/T=4,60$ ή $t=4,6T$.

Αυτό για το καλώδιο MT 3X240+25 AL τύπου XLPE που έχει χρονική σταθερά $T=30'$ σημαίνει ότι για να φτάσει σε θερμοκρασία $0,99*90=89$ βαθμών Κελσίου χρειάζεται χρόνο $4,6*40=2,3$ ώρες ή 2 ώρες και 18 πρώτα λεπτά . Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για μικρά χρονικά διαστήματα το καλώδιο μπορεί να υπερφορτιστεί χωρίς να ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, αρκεί στη συνέχεια να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν εμφανιστεί η επόμενη υπερφόρτιση .

Η τελική θερμοκρασία $\Delta\theta_t$ καλωδίου που διαρρέεται από ένταση I συνδέεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση I_n και την αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ (που δίνονται από τους πίνακες των επιτρεπόμενων φορτίσεων) με τη σχέση :

$$\frac{\Delta\theta_\tau}{\Delta\theta_n} = \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$$

Η βραχυχρόνια υπερφόρτιση επιτρέπεται μόνο αν διαρκεί τόσο μικρό χρονικό διάστημα ώστε η τελική θερμοκρασία του καλωδίου να μην υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη. Έτσι αν θέσουμε στην σχέση (3.1),

$$\Delta\theta = \Delta\theta_n \text{ και } n = I/I_n$$

θα πάρουμε τη σχέση:

$$n = \left[\frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

που απεικονίζεται στο παρακείμενο διάγραμμα ή την ισοδύναμη σχέση:

$$\frac{t}{T} = -\ln\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2: Βραχυχρόνια υπερφόρτιση

Οι σχέσεις 3.2 και 3.3. συνδέουν το χρόνο t που μπορεί να δεχτεί ένα καλώδιο την υπερένταση I χωρίς η θερμοκρασία του να υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη .

Ο πίνακας 3.4 μας δίνει τα ζεύγη των τιμών «η» και «t/T» ενώ ο πίνακας 3.5 μας δίνει τη χρονική σταθερά θέρμανσης (T)καλωδίων χαλκού και αλουμινίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β2-27							
ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΕΣ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ							
HLEKB2.XLS Φύλλο 5							
Με την προϋπόθεση ότι η θερμοκρ. των καλωδίων δεν υπερβαίνει τη μέγ. επιτρεπόμενη							
t : Επιτρεπόμενος χρόνος υπερφόρτισης του καλωδίου							
T : Η χρονική σταθερά θέρμανσης του καλωδίου							
$n = \frac{I}{I_n}$ Ο λόγος της έντασης υπερφόρτισης προς την ονομαστική φόρτιση							
Η σχέση μεταξύ του λόγου t/T και του 'n' δίνεται από τις διπλανές σχέσεις που είναι ισοδύναμες							
		$\frac{t}{T} = -\ln\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$				$n = \left[\frac{1}{1 - e^{-t/T}}\right]^{1/2}$	
n	t/T	n	t/T	n	t/T	n	t/T
1.01	3.927	2.10	0.257	4.00	0.065	7.60	0.0175
1.02	3.249	2.20	0.231	4.20	0.058	7.80	0.0166
1.03	2.858	2.30	0.210	4.40	0.053	8.00	0.0157
1.04	2.584	2.40	0.191	4.60	0.048	8.20	0.0150
1.05	2.375	2.50	0.174	4.80	0.044	8.40	0.0143
1.06	2.207	2.60	0.160	5.00	0.041	8.60	0.0136
1.07	2.067	2.70	0.148	5.20	0.038	8.80	0.0130
1.08	1.947	2.80	0.136	5.40	0.035	9.00	0.0124
1.09	1.843	2.90	0.127	5.60	0.032	9.20	0.0119
1.10	1.751	3.00	0.118	5.80	0.030	9.40	0.0114
1.20	1.186	3.10	0.110	6.00	0.028	9.60	0.0109
1.30	0.896	3.20	0.103	6.20	0.026	9.80	0.0105
1.40	0.714	3.30	0.096	6.40	0.025	10.00	0.0101
1.50	0.588	3.40	0.090	6.60	0.023	10.20	0.0097
1.60	0.495	3.50	0.085	6.80	0.022	10.40	0.0093
1.70	0.425	3.60	0.080	7.00	0.021	10.60	0.0089
1.80	0.369	3.70	0.076	7.20	0.019	10.80	0.0086
1.90	0.324	3.80	0.072	7.40	0.018	11.00	0.0083
2.00	0.288	3.90	0.068	7.60	0.017	11.20	0.0080

ΠΙΝΑΚΑΣ Β2-28		
ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ Η ΤΟΝ ΑΕΡΑ ΧΑΡΤΙΟΥ Η ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ 1 ΕΩΣ 20 kV		
ΔΙΑΤΟΜΗ	ΧΑΛΚΟΥ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
mm ²	T(σε πρώτα λεπτά)	
16	4	2,5
25	6	4
35	8	5
50	10	8
70	15	10
95	20	13
120	25	16
150	30	20
185	33	23
240	43	30
300	50	35

Πίνακας 3.4: Τιμές η και t/T[12]

Πίνακας 3.5: Χρονική σταθερά θέρμανσης (T) καλωδίων χαλκού και αλουμινίου[12]

3.1.5 Δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας).

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά στην εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος I_N (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (π.χ.: 10A, 200A, 400A κ.λπ.). Η χρονική διάρκεια της δοκιμής εξαρτάται από το είδος της κατασκευής (π.χ. στους μετασχηματιστές ελαίου διαρκεί περίπου 24 ώρες και στους διακόπτες 1÷2 ώρες). Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν η αύξηση της θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν υπερβαίνει περίπου την τιμή $\Delta\theta_N \approx 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (η ακριβής τιμή ανά είδος δοκιμίου, θα πρέπει να αναζητηθεί στους κανονισμούς IEC 60963). Η τιμή $\Delta\theta_N$ είναι δηλαδή η ονομαστική αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό ονομαστικό ρεύμα I_N . Το όριο αυτό των $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ικανοποιεί τις πρακτικές εφαρμογές, γιατί από τις οικονομοτεχνικές επιλογές των κατασκευών, που εφαρμόζονται επί αρκετά έτη, διαπιστώνεται ότι δεν αποσταθεροποιούνται οι επαφές λυόμενων ηλεκτρικών συνδέσμων και δεν δημιουργούνται προβλήματα υπερθέρμανσης στο λάδι μετασχηματιστών, λόγω ηλεκτρικών επαφών εντός αυτού.

Η εν λόγω οριακή τιμή σε στατικές επαφές (όπως επαφές ασφαλειοθηκών, επαφές αποζευκτών, επαφές σφικτήρων, επαφές αυτόματων διακοπών στη θέση εντός, κ.λπ.) πρέπει να αντικατοπτρίζει στην πράξη έναν ηλεκτρικό σύνδεσμο, που η αντίσταση διάβασής του είναι άνευ σημασίας για αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι περίπου $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (ακόμη και υπό συνθήκες υψηλού καύσωνα για υπαίθριες κατασκευές). Κατά τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι δεν θα αυξηθεί η αντίσταση διάβασης του ηλεκτρικού συνδέσμου, διαφορετικά για $\Delta\theta > \Delta\theta_N$ θα συμβεί αποσταθεροποίηση του λυόμενου ηλεκτρικού συνδέσμου, με επακόλουθο την αύξηση της αντίστασής του και την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, που είναι βέβαιο ότι θα οδηγήσει σε μείωση του ονομαστικού ρεύματος με εμφανή ίχνη συγκόλλησης των δύο μερών της επαφής και σε αρκετές περιπτώσεις και δημιουργία τηγμάτων μετάλλου. Αυτός είναι ο λόγος που επιβάλλεται προγραμματισμένα ο έλεγχος των ηλεκτρικών επαφών και μέσω της θερμοκάμερας ο ετήσιος έλεγχος των ηλεκτρικών συνδέσμων στα δίκτυα (όπως σφικτήρες, γέφυρες, συνδέσεις επί μονωτήρων, κ.λπ.).

Η τιμή $\Delta\theta_N$ εξετάζεται ακολούθως μέσω προσεγγιστικού τύπου αύξησης θερμοκρασίας αγωγών δικτύου διανομής υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

3.1.5.1 Προσεγγιστικός τύπος της αύξησης της θερμοκρασίας των αγωγών υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Έστω R είναι η αντίσταση ενός αγωγού μεταξύ δύο στύλων, όπου μας ενδιαφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), οι οποίοι προστατεύονται μέσω ασφαλειοαποξευκτών των 30 A. Τότε η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_A$ (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_A δίνεται, όπως αποδεικνύεται παρακάτω, από τη σχέση [15]:

$$\Delta\theta_A = \Delta\theta_N * \left(\frac{I_A}{I_N}\right)^2$$

όπου $\Delta\theta_N$ η αύξηση της θερμοκρασίας (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) υπό ονομαστικό ρεύμα I_N .

Όταν η αντίσταση R διαρρέεται από ρεύμα (λειτουργίας) I_A , ισχύει:

$$I_A^2 * R \approx \kappa * A * \Delta\theta \tag{3.4}$$

Για λειτουργία του ίδιου ακριβώς τμήματος του αγωγού υπό το ονομαστικό του ρεύμα I_N θα ήταν αντίστοιχα περίπου:

$$I_N^2 * R \approx \kappa * A * \Delta\theta_N \tag{3.5}$$

Από τις σχέσεις 3.4 και 3.5 προκύπτει:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_N * \left(\frac{I_A}{I_N}\right)^2 \tag{3.6}$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση 3.6 για ονομαστικό ρεύμα του αγωγού $I_N = 136 \text{ A}$ και $\Delta\theta_N = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι:

$$\Delta\theta = 40 * (30/136)^2 \approx 1,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

Συνεπώς, για θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ. $40 \text{ }^\circ\text{C}$, η θερμοκρασία του αγωγού θα ήταν:

$$\theta = 40 + \Delta\theta = 41,95^\circ\text{C}$$

Από τα παραπάνω, μπορεί γενικά να λεχθεί, ότι η θερμική καταπόνηση των αγωγών διανομής, λόγω του μέγιστου ρεύματος λειτουργίας τους, δεν συνεπάγεται τη δημιουργία τηγμάτων μετάλλου, καθόσον τα σημεία τήξης του αλουμινίου, του χαλκού και του χάλυβα είναι αντίστοιχα περίπου 660 , 1083 και $1350 \div 1500 \text{ }^\circ\text{C}$. [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

“ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ”

4.1 Σφάλματα (Βραχυκυκλώματα) στο εναέριο δίκτυο

Βραχυκύκλωμα ή σφάλμα υποδηλώνει τη μειωμένη αντίσταση μόνωσης και μπορεί να οριστεί ως η επαφή οποιουδήποτε υπό τάση τμήματος του δικτύου προς γη, ή προς γειωμένα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων, όπως επίσης και η επαφή δύο διαφορετικών υπό τάση τμημάτων, με διαφορετικές τάσεις μεταξύ τους. Σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί και η διακοπή ενός αγωγού χωρίς βραχυκύκλωμα καθώς και οι υπερπηδήσεις που μπορεί να δημιουργηθούν στο δίκτυο. Τα βραχυκυκλώματα εκδηλώνονται ως απότομες υπερεντάσεις πολλαπλάσιας τιμής από τα κανονικά ρεύματα λειτουργίας του δικτύου. Όπως είναι φανερό, η διέλευση των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως από τους αγωγούς του συστήματος, προκαλεί δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις με επιβλαβείς συνέπειες.

Η μόνωση στον αέρα είναι περισσότερο ευπρόσβλητη από την υγρή ή στερεά μόνωση, η οποία χρησιμοποιείται στις συσκευές ισχύος, ή στα καλώδια και ως εκ τούτου, οι εναέριες γραμμές υφίστανται τα περισσότερα βραχυκυκλώματα, ενώ τα καλώδια, οι μετασχηματιστές, οι διακόπτες, κ.λπ. μικρότερο μέρος. Τα κυριότερα αίτια των σφαλμάτων για τα εναέρια δίκτυα, είναι οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, τα ξένα αντικείμενα, η ρύπανση των μονωτήρων (θαλάσσια ή βιομηχανική), η γήρανση του καλωδίου και η πέραν των προβλέψεων επιφόρτιση των γραμμών από άνεμο ή χιόνι κ.λπ. .

Τα σφάλματα, ανάλογα του χρόνου παραμονής των στα δίκτυα διανομής, τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες:

- Στα παροδικά
- Στα μόνιμα

4.1.1 Παροδικά σφάλματα

Παροδικά σφάλματα είναι αυτά που δεν προκαλούν μόνιμη διακοπή και μπορούν να απαλειφθούν χωρίς την επέμβαση ανθρώπου. Αποτελούν συνήθως το 80%-90% των περιπτώσεων και οφείλονται κυρίως σε επαφή αγωγών λόγω ισχυρού ανέμου, πτηνά και άλλα ζώα, κεραυνοί, αστραπές κ.λπ. και διακρίνονται:

- Στα αυτοαποσβενόμενα : είναι εκείνα τα οποία απαλείφονται χωρίς την διακοπή τάσεως στο δίκτυο (π.χ. τόξο που δεν μπορεί να διατηρηθεί συνήθως λόγω του μεγάλου σχετικά μήκος του)
- Στα κυρίως παροδικά : είναι εκείνα για τα οποία αρκεί μία στιγμιαία διακοπή τάσεως στο δίκτυο για να απαλειφθούν (π.χ. σφάλμα διάρκειας δεκάτων του δευτερολέπτου)
- Στα ημιμόνιμα : είναι εκείνα για τα οποία δεν αρκεί μία στιγμιαία διακοπή τάσεως στο δίκτυο αλλά απαιτείται και μία μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας για να απαλειφθούν

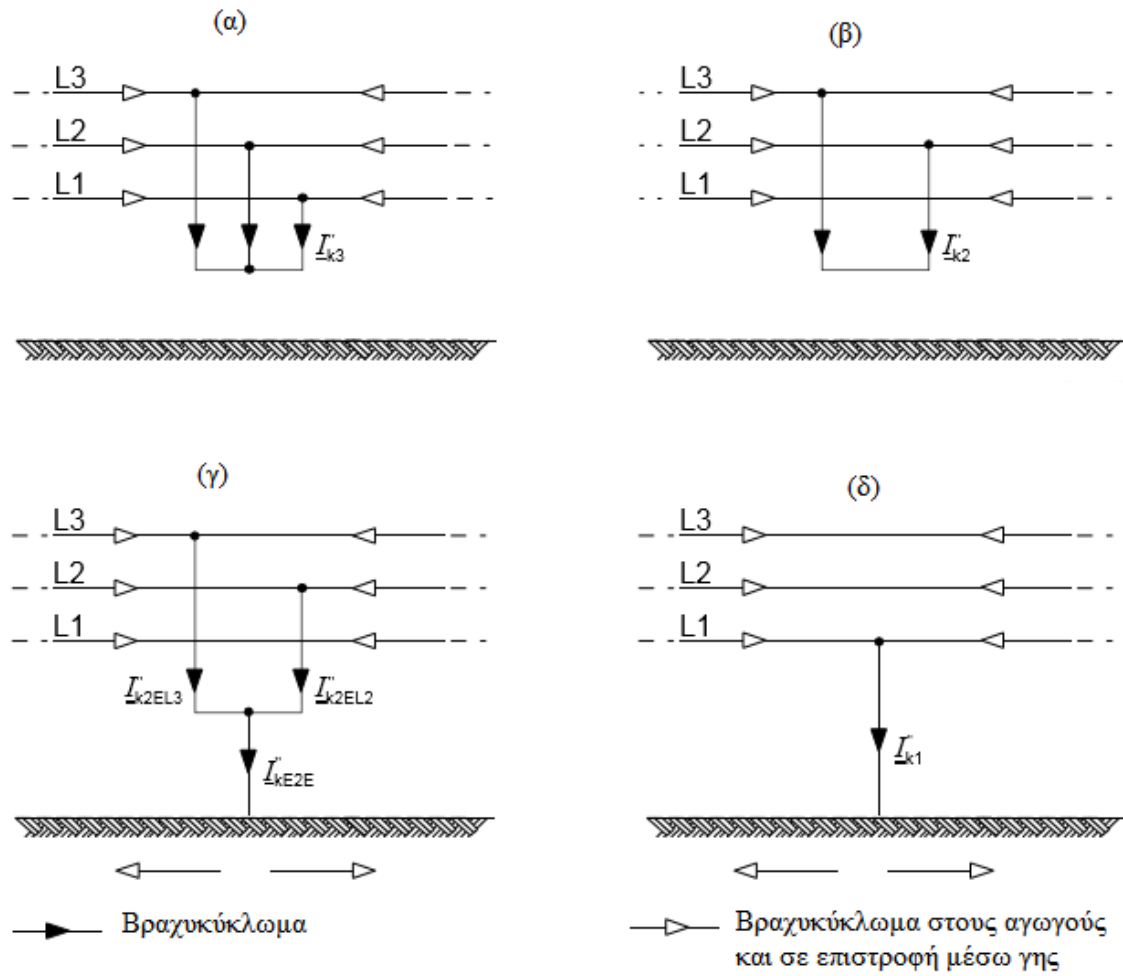
Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο διανομής MT τροφοδοτείται σχεδόν άμεσα, μετά από ένα στιγμιαίο άνοιγμα του διακόπτη ισχύος προστασίας της γραμμής (π.χ. του διακόπτη ισχύος του υποσταθμού 150/20-15 kV ή ενός διακόπτη ισχύος αυτομάτων επαναφορών (ΔΑΕ) ή recloser, που τοποθετείται συνήθως στο μέσον μιας γραμμής μεγάλου μήκους, προκειμένου να ανιχνεύει σφάλματα στο άκρο της γραμμής MT.

4.1.2 Μόνιμα σφάλματα

Μόνιμα σφάλματα είναι αυτά που προκαλούν μόνιμη διακοπή και απαιτείται η προσέλευση συνεργείου τεχνικών στο σημείο της βλάβης, προκειμένου να επιδιορθωθεί το εσφαλμένο τμήμα και να τροφοδοτηθεί κανονικά το δίκτυο.

Τα σφάλματα στα δίκτυα διανομής τα διακρίνουμε :

- Μεταξύ φάσεων (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό). Το μέγιστο σφάλμα αυτού του είδους είναι το τριφασικό στη αρχή της γραμμής και το ελάχιστο σφάλμα το διφασικό στο πιο απομακρυσμένο σημείο (άκρο).
- Μεταξύ φάσεως με γη. Το μέγιστο σφάλμα είναι στην αρχή της γραμμής, ενώ το ελάχιστο στο άκρο μέσω μιας αντίστασης γείωσης 40Ω



Σχήμα 4.1: Χαρακτηρισμός τύπου βραχυκυκλώματος
 (α) Τριφασικό βραχυκύκλωμα
 (β) Διφασικό βραχυκύκλωμα
 (γ) Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη
 (δ) Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη

4.1.3 Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων

Ακολούθως δίνονται αναλυτικοί υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων[17]:



Σχήμα 4.2: Ενδεικτική απεικόνιση γραμμής κορμού ΜΤ με σφάλμα στο σημείο k

4.1.3.1 Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Το κύκλωμα παραμένει συμμετρικό με ισοδύναμη αντίσταση thevenin

$$Z_{kk} = Z_t + Z$$

Όπου $Z_t = Z_{t1}$ η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του Μ/Σ 150/15-20 kV, $Z = Z_1$ η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γραμμής και V_f η ονομαστική φασική τάση.

Επομένως το τριφασικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_{3\phi}$ είναι:

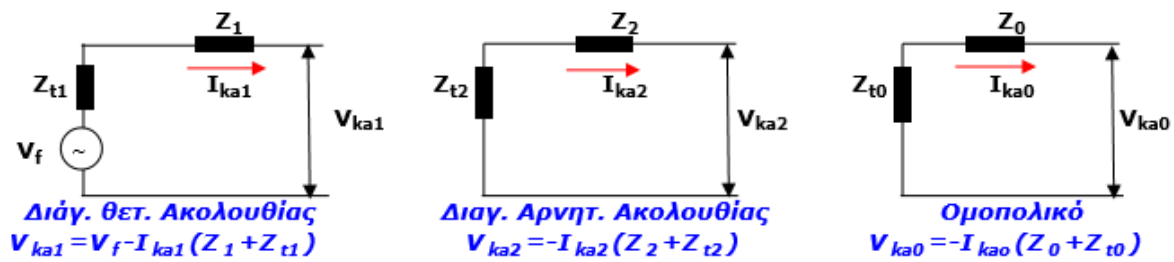
$$I_{3\phi} = I_k = V_f / Z_{kk}$$

4.1.3.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη φάση Α

Το κύκλωμα είναι ασύμμετρο και αναλύεται με τις συμμετρικές συνιστώσες.

Οι συνθήκες του σφάλματος είναι: $V_{ka} = I_{ka}(Z_f + Z_n)$, $I_{kb} = 0$, $I_{kc} = 0$

Από τα ισοδύναμα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας (ομοπολικό) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :



Σχήμα 4.3: Διαγράμματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Από τις συνθήκες του σφάλματος προκύπτει :

$$I_{ka1} = I_{ka2} = I_{ka0} = (1/3)I_{ka}$$

Επίσης:

$$V_{ka} = V_{ka1} + V_{ka2} + V_{ka0}$$

Τα τρία δίκτυα συμμετρικών συνιστωσών συνδέονται σε σειρά.

Ως εκ τούτου έχουμε:

$$V_{ka} = I_{ka} * (Z_f + Z_n) = V_f - (Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t0})(1/3)I_{ka}$$

Άρα το μονοφασικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_{1\phi}$ είναι:

$$I_{1\phi} = I_{ka} = V_f / (Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t0} + 3Z_f + 3Z_n) / 3$$

4.1.3.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα στις φάσεις Β και C

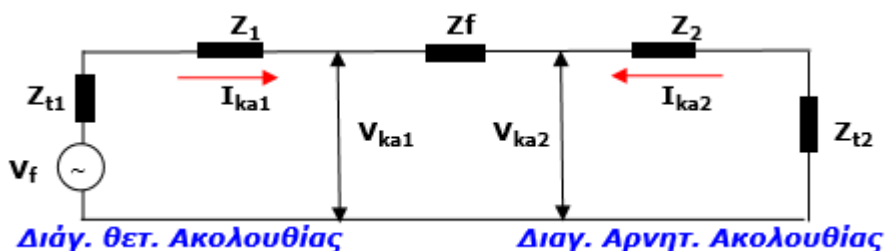
Το κύκλωμα είναι ασύμμετρο και αναλύεται με τις συμμετρικές συνιστώσες.

Οι συνθήκες του σφάλματος είναι :

$$V_{kb} - V_{kc} = I_{kb} * Z_f \tag{4.1}$$

$$I_{ka} = 0, I_{kb} = -I_{kc} \tag{4.2}$$

Από τα ισοδύναμα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας τα δύο δίκτυα συνδέονται παράλληλα. Στην περίπτωση διαφασικού βραχυκυκλώματος δεν περιλαμβάνεται ομοπολικό δίκτυο. Επομένως προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο διαφασικό βραχυκύκλωμα

Με βάση την ανάλυση σε συμμετρικές συνιστώσες ισχύουν τα εξής:

$$\begin{aligned} V_{kb} - V_{kc} &= (V_{kb1} + V_{kb2}) - (V_{kc1} + V_{kc2}) = (\alpha^2 - \alpha)V_{ka1} + (\alpha - \alpha^2)V_{ka2} = \\ &= (\alpha^2 - \alpha)(V_{ka1} - V_{ka2}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$I_{kb} * Z_f = (I_{kb1} + I_{kb2})Z_f = (\alpha^2 * I_{ka1} + \alpha * I_{ka2}) * Z_f \quad (3) \quad (4.4)$$

Με βάση τις (4.3) και (4.4)η σχέση (4.1) γράφεται:

$$(\alpha^2 - \alpha)(V_{ka1} - V_{ka2}) = (\alpha^2 - \alpha) * I_{ka1} * Z_f \quad (4.5) \quad \text{όπου} \quad I_{ka1} = -I_{ka2}$$

Από τη σχέση (4.5) προκύπτει:

$$V_{ka1} - V_{ka2} = I_{ka1} * Z_f \quad (4.6) \quad (\text{ακριβώς η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση } Z_f)$$

Επίσης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$V_{ka1} = V_f - I_{ka1}(Z_{t1} + Z_1) \quad (4.7)$$

$$V_{ka2} = -I_{ka2}(Z_{t2} + Z_2) \quad (4.8)$$

Άρα από (4.6),(4.7) και (4.8) προκύπτει:

$$I_{ka1} = V_f / (Z_1 + Z_2 + Z_f + Z_{t1} + Z_{t2}) \quad (4.9)$$

Επομένως προκύπτει ότι το ρεύμα του διαφασικού βραχυκυκλώματος $I_{2\phi}$ είναι:

$$I_{2\phi} = I_{kb} = (\alpha^2 - \alpha)V_f / (Z_1 + Z_2 + Z_f + Z_{t1} + Z_{t2})$$

4.1.4 Εντοπισμός του σφάλματος

Στα εναέρια ακτινικά δίκτυα χωρίς παραγωγούς ΑΠΕ, ο εντοπισμός του μόνιμου σφάλματος γίνεται μέσω ενδεικτικών διέλευσης σφάλματος (FPI) εγκατεστημένα (μέσω ειδικού μονωτικού ακοντίου) ένα ανά αγωγό ΜΤ, συνολικά επομένως ένα σετ τριών ενδεικτικών ανά θέση. Όταν η τιμή του ρεύματος της γραμμής ξεπεράσει ένα κατώφλι (απόλυτη τιμή) σύμφωνα με τη μελέτη της γραμμής, π.χ. 100 Α, ή 200 Α ή 300 Α τα ενδεικτικά σφάλματος διεγείρονται, ανάβουν οι λυχνίες led του ενδεικτικού, οι οποίες είναι ορατές δια γυμνού οφθαλμού από το συνεργείο βλαβών. Ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος μπορεί επίσης να γίνει και από ένα κέντρο ελέγχου αρκεί η πληροφορία να μεταδίδεται σε αυτό.

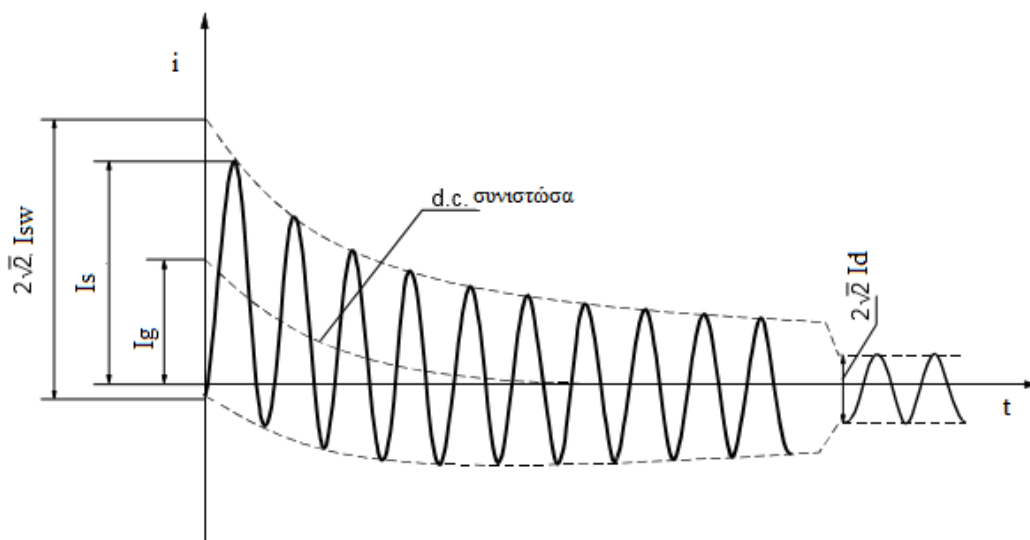
Στα ενδεικτικά σφάλματος εναερίου ακτινικού δικτύου, η διέγερσή τους εκτός από την απόλυτη τιμή επιτυγχάνεται επίσης και από μία γρήγορη μεταβολή του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο (di/dt).



Εικόνα 12: Ενδεικτικό σφάλματος ακτινικού εναερίου δικτύου ΜΤ

4.2 Θερμική καταπόνηση αγωγών μέσης τάσης

4.2.1 Ανάλυση του ρεύματος βραχυκύκλωσης



Σχήμα 4.5: Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα [15].

Από το σχήμα 4.5 παρατηρείται ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sw}) και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_g). Το συμμετρικό τμήμα αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_d). Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_s).

Η τιμή του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης ενδιαφέρει ιδιαίτερα στους υπολογισμούς μηχανικών καταπονήσεων, οι οποίες εκδηλώνονται στο αρχικό στάδιο του βραχυκυκλώματος (π.χ. εξάσκηση δυνάμεων μεταξύ των ζυγών ενός πίνακα μέσης τάσης, εξάσκηση δυνάμεων στους κοχλίες σύνδεσης επί των μονωτήρων, κ.λπ.). Αντίθετα, η τιμή του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης έχει ιδιαίτερη σημασία για τον προσδιορισμό των θερμικών καταπονήσεων των κατασκευών (π.χ. υπερθέρμανση ζυγών, επαφών διακοπών, πηνίων μετασχηματιστών, κ.λπ.).

Η σχέση που συνδέει το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι :

$$I_s = k\sqrt{2}I_{sw}$$

Ο συντελεστής κ εξαρτάται από την τιμή της ολικής ωμικής αντίστασης $R_{ολ}$ και την τιμή της ολικής επαγωγικής αντίστασης $X_{ολ}$ μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης. Οι τιμές του συντελεστή κ δίνονται στον επόμενο πίνακα :

$R_{ολ}/X_{ολ}$	κ	$R_{ολ}/X_{ολ}$	κ
0,00	1,800	0,65	1,120
0,05	1,680	0,70	1,110
0,10	1,590	0,75	1,100
0,15	1,500	0,80	1,095
0,20	1,440	0,85	1,090
0,25	1,380	0,90	1,080
0,30	1,330	0,95	1,075
0,35	1,290	1,00	1,070
0,40	1,250	1,05	1,065
0,45	1,220	1,10	1,060
0,50	1,190	1,15	1,055
0,55	1,170	1,20	1,050
0,60	1,140		

Πίνακας 4.1: Συντελεστής κ ως συνάρτηση του $R_{ολ}/X_{ολ}$

$$\kappa = f(R_{ολ}/X_{ολ})$$

Το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα υπολογίζεται από τον τύπο :

$$I_{SW} = \frac{1,1 * U_N}{\sqrt{3} * Z_{ολ}}$$

Αντίστοιχα, για το διφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα, το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι :

$$I_{SW} = \frac{1,1 * U_N}{2 * Z_{ολ}}$$

όπου U_N η ονομαστική τάση στη θέση βραχυκύκλωσης και $Z_{ολ}$ είναι η ολική σύνθετη αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης, η οποία προκύπτει από τη σχέση :

$$Z_{ολ} = \sqrt{R_{ολ}^2 + X_{ολ}^2}$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης για το δίκτυο διανομής μέσης τάσης:

Ονομαστική τάση UN (kV)	Μέγιστη τάση λειτουργίας U _{max} (kV)	Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης I _{sw} (kA)
6,6	7,2	10
15	17,5	10
20	24	7,2

Πίνακας 4.2: Τιμές του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης για το δίκτυο διανομής μέσης τάσης [12].

Το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να γραφεί σε συνάρτηση με το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης ως εξής :

$$I_d = \mu_d * I_{sw} \quad (4.10)$$

όπου μ_d ένας συντελεστής, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το πηλίκο I_{sw}/I_G .

Το I_G είναι το ονομαστικό ρεύμα της πηγής (των γεννητριών). Οι τιμές του συντελεστή μ_d δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

I_{sw}/I_G	μ_d ($\cos\phi = 0,8$)	I_{sw}/I_G	μ_d ($\cos\phi = 0,8$)
0,1	1,0	1,6	0,70
0,2	0,97	2,0	0,67
0,3	0,96	3,0	0,58
0,4	0,93	4,0	0,52
0,5	0,90	5,0	0,49
0,6	0,89	6,0	0,44
0,7	0,87	7,0	0,41
0,8	0,85	8,0	0,40
0,9	0,82	9,0	0,39
1,0	0,80	10,0	0,35

Πίνακας 4.3: Τιμές συντελεστή μ_d σε συνάρτηση με I_{sw}/I_G [15]

Το ρεύμα διακοπής (I_{α}) είναι το εναλλασσόμενο τμήμα του ρεύματος βραχυκύκλωσης τη χρονική στιγμή της διακοπής του ρεύματος από το μέσο προστασίας. Η τιμές του ρεύματος διακοπής, καθώς και της ισχύος διακοπής (P_{α}), έχουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των διακοπών ισχύος ή των ασφαλειών, ανάλογα με το μέσο προστασίας της εγκατάστασης. Ο υπολογισμός των I_{α} και P_{α} μπορεί να γίνει από τις σχέσεις :

$$I_{\alpha} = \mu * I_{SW}$$

$$P_{\alpha} = \sqrt{3} * U_N * I_{\alpha}$$

Οι τιμές του συντελεστή μ δίνονται στον επόμενο πίνακα :

I_{SW} / I_G	για $\cos\phi=0,8$	
	$\mu_{0,1s}$	$\mu_{0,25s}$
από 0,1 έως 1,6	1,0	1,0
2	0,97	0,95
3	0,90	0,85
4	0,85	0,77
5	0,80	0,72
6	0,79	0,70
7	0,70	0,67
8	0,75	0,65
9	0,74	0,63
10	0,74	0,62

Πίνακας 4.4: Τιμές συντελεστή μ σε συνάρτηση με I_{sw}/I_G για $\cos\phi = 0,8$

$\mu_{0,1s}$: τιμή για χρόνο διακοπής $\sim 0,1$ s

$\mu_{0,25s}$: τιμή για χρόνο διακοπής $\sim 0,25$ s

4.2.2 Αύξηση θερμοκρασίας σε αγωγούς λόγω βραχυκυκλώματος (προσεγγιστική μέθοδος)

Το βραχυκύκλωμα προκαλεί στους αγωγούς, στις επαφές (λυόμενες ή μόνιμες) και στον εξοπλισμό, που είναι στη διαδρομή βραχυκύκλωσης, μία επιπλέον θερμική καταπόνηση. Η θερμική καταπόνηση του αγωγού εξαρτάται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης και το χρόνο που απαιτείται για τη διακοπή του βραχυκυκλώματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού υπολογίζεται από τη σχέση :[15]

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} * I_d^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{sw}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

όπου :

- $\Delta\theta$, αύξηση της θερμοκρασίας σε °C
- I_d , διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης σε A
- I_{sw} , εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης σε A
- κ , σταθερά του υλικού ($\kappa = 0,0058$ για χαλκό και $\kappa = 0,0135$ για αλουμίνιο)
- A , διατομή του αγωγού σε mm²
- t , χρόνος από την εμφάνιση μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος
- T , συντελεστής χρόνου ($T = 0,3 - 0,15$ για τριφασικό βραχυκύκλωμα, $T = 0,6 - 0,25$ για διφασικό βραχυκύκλωμα). Η τιμή του T μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης.

Οι οριακές θερμοκρασίες για γυμνούς αγωγούς και καλώδια δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν :

Γυμνοί αγωγοί	
Υλικό	$\Delta\theta$ (°C)
χαλκός	200
αλουμίνιο	180

Πίνακας 4.5: Οριακή θερμοκρασία για γυμνούς αγωγούς.

Καλώδια		
U σε kV	Θερμοκρασία λειτουργίας σε (°C)	θ σε (°C)
1 – 6	45	120
10 – 20	35	115
30 – 60	25	100
Καλώδια χαμηλής τάσης		150

Πίνακας 4.6 : Θερμοκρασία λειτουργίας και οριακή θερμοκρασία για καλώδια.

4.2.3 Αύξηση θερμοκρασίας σε αγωγούς λόγω βραχυκυκλώματος κατά IEC 865-1

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 865-1 η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\theta = \frac{\left[\frac{S^2 \cdot t \cdot a}{e^{\sigma \cdot \gamma \cdot c} - 1} \right]}{a} \quad (4.12)$$

Όπου:

S: η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης,

a: ο θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης,

σ: η αγωγιμότητα του αγωγού,

γ: η πυκνότητα του αγωγού

c: η θερμοχωρητικότητα του αγωγού.

Οι τιμές a, σ, γ και c δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Είδος αγωγού	a[1/°C]	σ[1/Ωm]	γ[kg/m ³]	c[Joule/Kg °C]
Χαλκός	0,00393	56,0.10 ⁶	8900	390
Αλουμίνιο	0,00403	34,8.10 ⁶	2700	910
Σίδηρος	0,0045	7,25.10 ⁶	7850	480

Πίνακας 4.6: Τιμές a, σ, γ και c ανάλογα με το υλικό των αγωγών

Η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης S υπολογίζεται από την σχέση:

$$S = \frac{10^6 * I_{th}}{A} \sigma \varepsilon \frac{A}{m^2}$$

όπου A η διατομή σε mm^2 και I_{th} είναι το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το οποίο ισχύει:

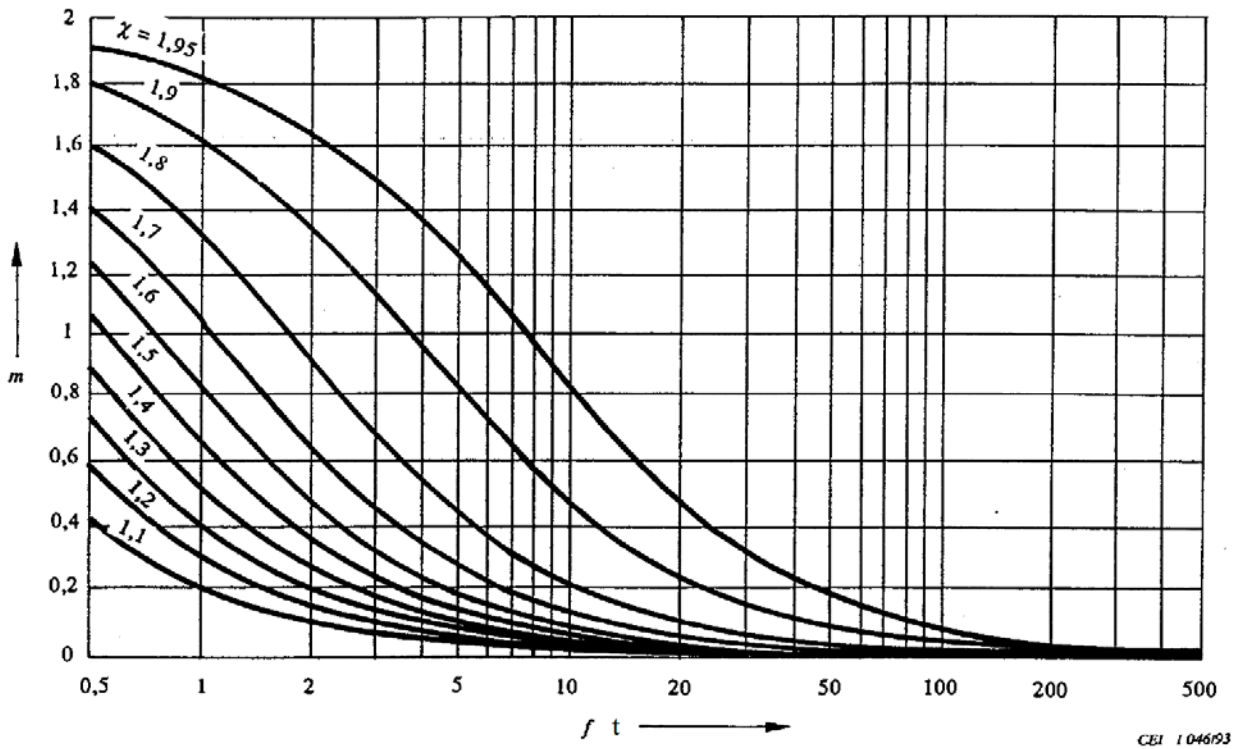
$$I_{th} = I_{sw} * (m + n)^{\frac{1}{2}}$$

όπου m και n δυο συντελεστές που προκύπτουν από τα σχήματα 1 και 2 αντίστοιχα.

Για τον συντελεστή m απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή χ ο οποίος δίνεται από την σχέση:

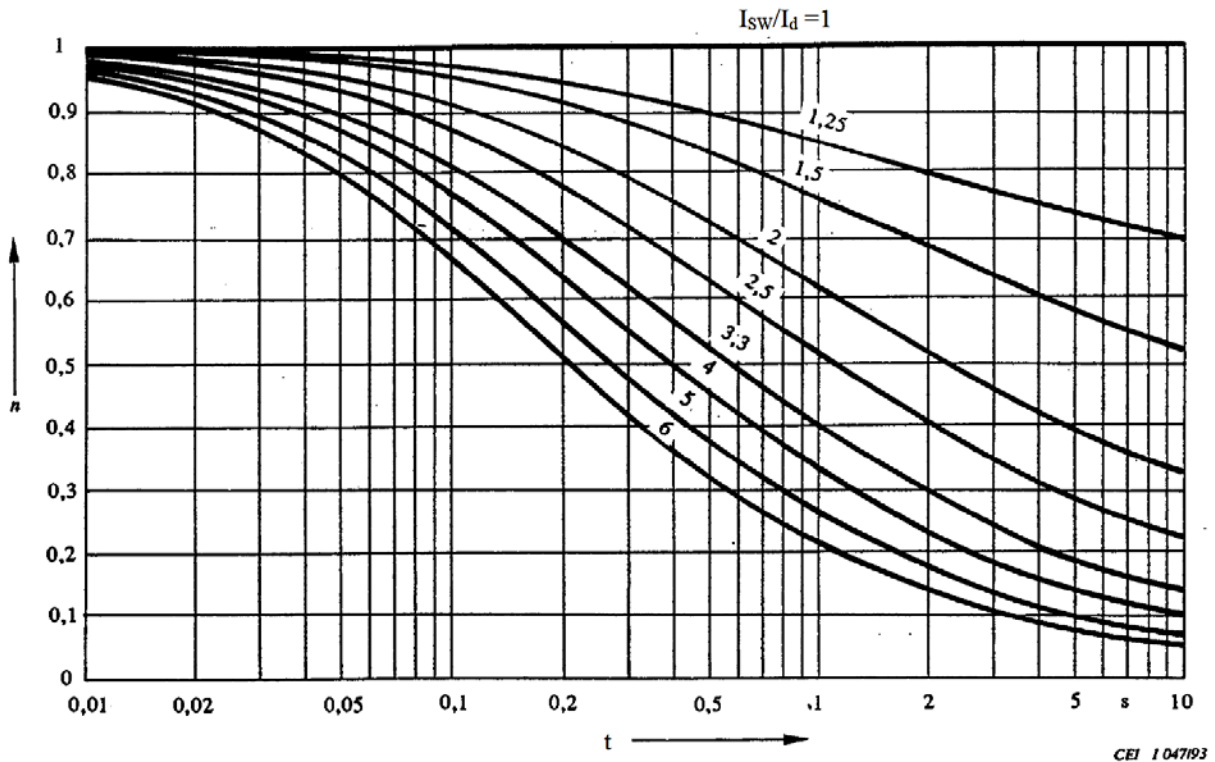
$$\chi = 1,02 + 0,98 * e^{\left(\frac{R_{\gamma\rho}}{X_{\gamma\rho}}\right)} \quad (4.13)$$

όπου $R_{\gamma\rho}$ και $X_{\gamma\rho}$ η ωμική και επαγωγική αντίσταση μέχρι τη θέση του σφάλματος. Όταν γίνεται χρήση της προσεγγιστικής μεθόδου για τον υπολογισμό του I_{sw} , το χ λαμβάνεται ίσο με 1,95 (η δυσμενέστερη περίπτωση). [18]



Σχήμα 4.6: Συντελεστής m της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης

- οριζόντιος άξονας είναι το: γινόμενο της συχνότητας του συστήματος (δηλαδή $f=50$ Hz) και του χρόνου διακοπής.
- Οι καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν στον συντελεστή χ της σχέσης (4.13)



Σχήμα 4.7: Συντελεστής η της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

- Οι καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν στους διάφορους λόγους I_{sw}/I_d

Εφαρμογή των μεθόδων των παραγράφων 4.2.2 και 4.2.3 για τον υπολογισμό της $\Delta\theta$ μιας γραμμής μέσης τάσης.

Μία γραμμή μέσης τάσης AAAC 185 mm² ηλεκτροδοτείται από κέντρο διανομής 150 kV/20 kV ισχύος $P_N=50$ MVA με τάση βραχυκυκλώσεως $u_k=22$ %. Η εν λόγω γραμμή προστατεύεται έναντι βραχυκυκλώματος με ελαιδιακόπτη εντός του κέντρο διανομής.

Ακολούθως θα υπολογιστεί η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την 1^η διακοπή ρεύματος μέσω του ελαιδιακόπτη, τόσο με την προσέγγιση μέθοδο μέσω του μ_a (σχέση 4.11), όσο και με την μέθοδο όσο κατά IEC 865-1.

Το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή του εν λόγω κέντρου ήταν:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} * U_N} = \frac{50000}{\sqrt{3} * 20} \approx 1443 \text{ A}$$

Γι' αυτό, με $u_k=22\%$ είναι:

$$I_{SW} \leq 100 * \frac{I_N}{u_k} = \frac{100 * 1,443}{22} = 6,559 \text{ kA}$$

Έτσι, επειδή:

$$\frac{I_{SW}}{I_N} = \frac{6559}{1,443} \approx 4,5$$

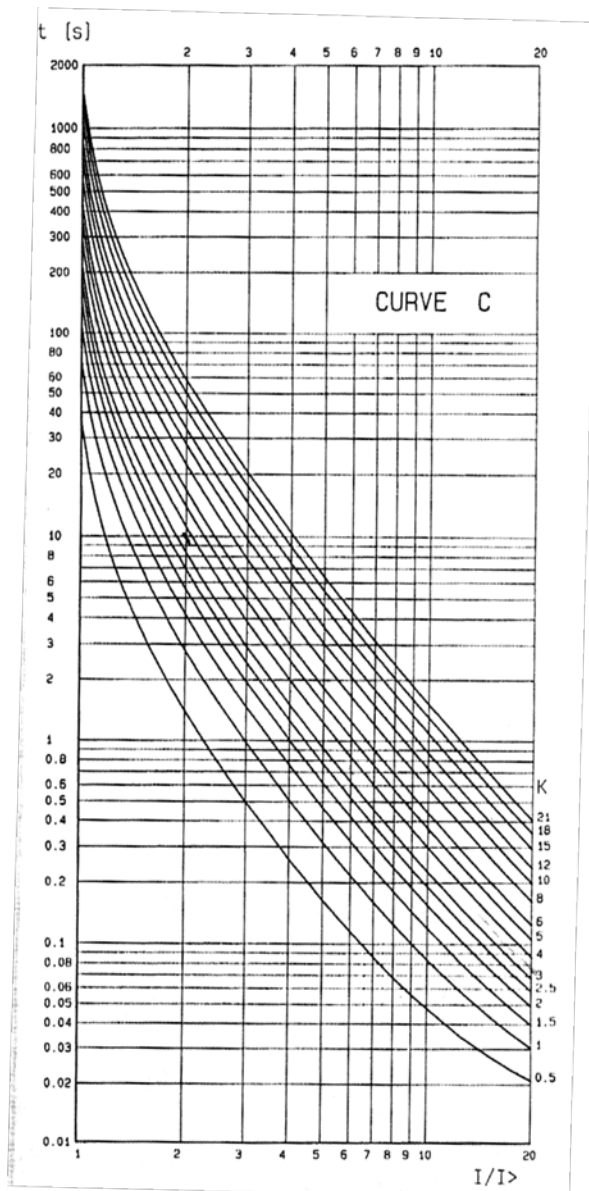
Με βάση τον πίνακα 4.3:

$$\mu_d \approx 0,5$$

Με βάση τη σχέση 4.10:

$$I_d = 0,5 * 6,559 = 3,279 \text{ kA}$$

Σχήμα 4.8: Καμπύλες ρεύματος χρόνου του ηλεκτρονόμου προστασίας της επίμαχης γραμμής μέσης τάσης για σφάλματα προς γη.



Η καμπύλη ρεύματος χρόνου του ηλεκτρονόμου μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η προστασία της γραμμής από σφάλματα προς γη φαίνεται στο σχήμα 4.8. Ο ηλεκτρονόμος, σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας ηλεκτρισμού είναι ρυθμισμένος με $k = 3,5$ και $I \geq 80$ A. Επομένως, με διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_d = 3,285$ kA ο χρόνος διακοπής είναι $t = 0,1$ s.

Υπολογισμός με την προσεγγιστική μέθοδο μέσω της σχέσης 4.11:

Για $t=0,1$ s, $T=0,3$ (δυσμενέστερη περίπτωση), $I_d = 3,285$ kA, $k=3,5$, $A=181,62$ mm² και $I_{SW}=6,559$ kA

έχουμε:

$$\Delta\theta = \kappa * I_d^2 * \left[\frac{t + T * \left(\frac{I_{SW}}{I_d}\right)^2}{A^2} \right] = 0,0135 * 3,285^2 * \left[\frac{0,1 + ,03 * \left(\frac{6,559}{3,285}\right)^2}{181,62^2} \right] = 5,72^\circ\text{C}$$

Υπολογισμός με τη μέθοδο κατά IEC 865-1:

- $f=50$ Hz και $t=0,1$ s, οπότε είναι: $f*t = 50*0,1 = 5$ και επομένως από το σχήμα 4.6 προκύπτει: $m=1,2$.
- Λαμβάνεται $I_{SW}/I_d = 1$ (δυσμενέστερη περίπτωση, το I_d είναι άγνωστο με την μέθοδο αυτή) και επομένως από το σχήμα 4.7 προκύπτει: $n=1$.

Κατόπιν των ανωτέρω το θερμικό ρεύμα είναι:

$$I_{th} = I_{SW} * (m + n)^{\frac{1}{2}} = 6559 * 2,2^{\frac{1}{2}} = 9728 \text{ A}$$

και η πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$S = \frac{10^6 * I_{th}}{A} = \frac{10^6 * 9728}{181,62} = 53,5 * 10^6 \text{ A/m}^2$$

Συνεπώς, η αύξηση της θερμοκρασίας με βάση τη σχέση 4.12:

$$\Delta\theta = \frac{\left[e^{\frac{S^2 \cdot t \cdot a}{\sigma \cdot \gamma \cdot c}} - 1 \right]}{a} = \frac{\left[e^{\frac{53,5^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,1 \cdot 0,004}{34,8 \cdot 10^{12} \cdot 2700 \cdot 910}} - 1 \right]}{0,004} \approx 3,4^\circ\text{C}$$

- Διαπιστώνεται ικανοποιητική ταύτιση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων. Η μεταβολή της θερμοκρασίας και με τις δύο μεθόδους είναι μεγαλύτερη από την πραγματική τιμή της.
- Παρόλο που η μέθοδος κατά IEC 865-1 είναι πιο ακριβής, για τους υπολογισμούς συνιστάται να εφαρμόζεται η προσεγγιστική μέθοδος μέσω της σχέσης 4.11, καθόσον οι τιμές τις $\Delta\theta$ είναι μεγαλύτερες (δυσμενέστερη συνθήκη).

4.2.4 Αύξηση της θερμοκρασίας ενός αυτομάτου διακόπτη επαναφοράς στους τρεις κύκλους λειτουργίας του.

Βάσει των στοιχείων που ειπώθηκαν στη παράγραφο 1.4, οι αυτόματοι διακόπτες μπορεί να έχουν τρεις κύκλους λειτουργίας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού θα είναι διαφορετική κάθε φορά που ο αυτόματος διακόπτης θα σταματάει την ηλεκτροδότηση της γραμμής. Θεωρούμε ότι ο χρόνος διακοπής στην επόμενη χρονική καθυστέρηση του διακόπτη είναι αυξημένος κατά 40% περίπου του χρόνου διακοπής της προηγούμενης χρονικής καθυστέρησης. Επομένως, η διαφορά θερμοκρασίας του αγωγού σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για κάθε κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ θα είναι :

1^{ος} κύκλος λειτουργίας

$$\Delta\theta_1 = \frac{\kappa}{A^2} * I_d^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{SW}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (4.14)$$

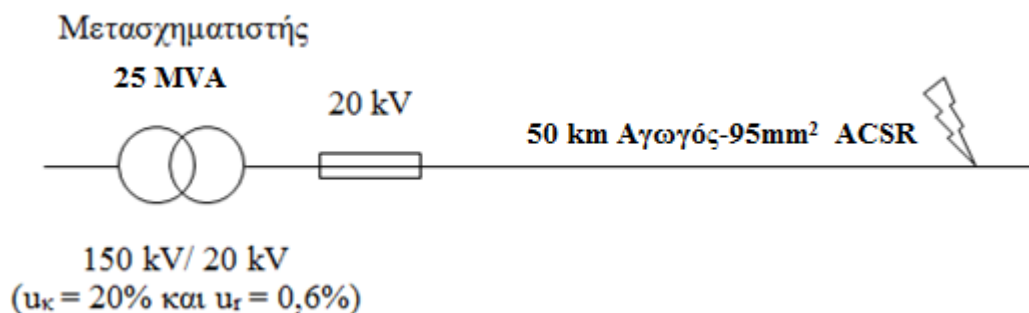
2^{ος} κύκλος λειτουργίας

$$\Delta\theta_2 = \frac{\kappa}{A^2} * I_d^2 * \left[t * \sqrt{2} + T * \left(\frac{I_{SW}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (4.15)$$

3^{ος} κύκλος λειτουργίας

$$\Delta\theta_3 = \frac{\kappa}{A^2} * I_d^2 * \left[t * 2 + T * \left(\frac{I_{SW}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (4.16)$$

Στην ενότητα αυτή, θα δοθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της θερμικής καταπόνησης μίας γραμμής μέσης τάσης, τύπου ACSR – 95, κατά την εκδήλωση τριφασικού ή διφασικού βραχυκυκλώματος στον αέρα για τους τρεις κύκλους λειτουργίας του αυτόματου διακόπτη επαναφοράς .



Σχήμα 4.9: Σφάλμα σε εναέρια γραμμή, μήκους 50km, διατομής 95mm²ACSR.

Μετασχηματιστής 150kV/20 kV, ονομαστικής ισχύος 25 MVA (u_κ = 20% και u_τ = 0,6%), τροφοδοτεί μία τριφασική γραμμή των 20 kV, που αποτελείται από τρεις γυμνούς αγωγούς τύπου ACSR – 95. Η γραμμή προστατεύεται από το βραχυκύκλωμα μέσω αυτόματου διακόπτη επαναφοράς των 20 kV, ο οποίος διακόπτει το βραχυκύκλωμα σε χρόνο 0,15 s. Για τη μελέτη αντοχής στο βραχυκύκλωμα σε μία θέση του δικτύου, θα πρέπει να είναι γνωστές οι αντιστάσεις της διαδρομής βραχυκύκλωσης, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sw}). Επομένως, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι αντιστάσεις του μετασχηματιστή υψηλής προς μέση τάση και η ωμική – επαγωγική αντίσταση της εναέριας γραμμής μέσης τάσης :

Οι αντιστάσεις του μετασχηματιστή:

$$R_{M\Sigma} = u_r * \frac{U_N^2}{P_N} = 0,006 * \frac{20^2}{25} = 0.096 \Omega$$

$$X_{M\Sigma} = (u_k^2 - u_r^2)^{0,5} * \frac{U_N^2}{P_N} = (0,2^2 - 0,006^2)^{0,5} * \frac{20^2}{25} = 3,199\Omega$$

Η ωμική και επαγωγική αντίσταση της εναέριας γραμμής ΜΤ :

Για αγωγό ACSR – 95 η ωμική αντίσταση είναι R_{γρ} = 0,215 Ω/km και η επαγωγική αντίσταση είναι Χ_{γρ} = 0,334 Ω/km. Επομένως, για βραχυκύκλωμα σε απόσταση 100 km από το μετασχηματιστή μέσης τάσης, η ωμική και επαγωγική αντίσταση της γραμμής θα είναι :

$$R_{\gamma\rho} = 0,215 * 50 = 10,75\Omega$$

$$X_{\gamma\rho} = 0,334 * 50 = 16,7 \Omega$$

Ολική σύνθετη αντίσταση :

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι η ολική σύνθετη αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης είναι :

$$Z_{o\lambda} = \sqrt{(R_{M\Sigma} + R_{\gamma\rho})^2 + (X_{M\Sigma} + X_{\gamma\rho})^2} = 22,66 \Omega$$

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του εναλλασσόμενου και διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης, καθώς και των θερμικών καταπονήσεων της γραμμής, για τριφασικό και διφασικό σφάλμα.

➤ Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$I_{3,sw} = \frac{1,1 * U_N}{\sqrt{3} * Z_{o\lambda}} = \frac{1,1 * 20 * 10^3}{\sqrt{3} * 22,66} = 0,561kA$$

Διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης :

Για το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης, ο συντελεστής μd θα πάρει την μικρότερη και μεγαλύτερη δυνατή τιμή του, δηλαδή 0,35 (καλύτερη περίπτωση) και 1 (δυσμενέστερη περίπτωση).

Επομένως:

$$I_{3,d1} = 0,35 * I_{3,sw} = 0,35 * 0,561 = 0,196kA$$

$$I_{3,d2} = 1 * I_{3,sw} = 1 * 0,561 = 0,561kA$$

Αύξηση θερμοκρασίας του αγωγού :

Η διαφορά θερμοκρασίας στον αγωγό (σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) κατά την εκδήλωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, όταν $\mu d = 0,35$, είναι:

1^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,1} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d1}^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d1}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,196^2 * 10^6 * \left[0,15 + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,196} \right)^2 \right] \\ &= 0,05557 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

2^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,2} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d1}^2 * \left[t * \sqrt{2} + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d1}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,196^2 * 10^6 * \left[0,15 * \sqrt{2} + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,196} \right)^2 \right] = 0,05689 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

3^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,3} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d1}^2 * \left[t * 2 + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d1}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,196^2 * 10^6 * \left[0,15 * 2 + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,196} \right)^2 \right] \\ &= 0,05876 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

Αντίστοιχα, η διαφορά θερμοκρασίας στον αγωγό (σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) κατά την εκδήλωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, όταν $\mu d = 1$, είναι :

1^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,1} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d2}^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d2}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,561^2 * 10^6 * \left[0,15 + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,561} \right)^2 \right] \\ &= 0,07856 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

2^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,2} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d2}^2 * \left[t * \sqrt{2} + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d2}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,561^2 * 10^6 * \left[0,15 * \sqrt{2} + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,561} \right)^2 \right] = 0,08941 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

3^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{3,3} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{3,d2}^2 * \left[t * 2 + T * \left(\frac{I_{3,SW}}{I_{3,d2}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,561^2 * 10^6 * \left[0,15 * 2 + 0,3 * \left(\frac{0,561}{0,561} \right)^2 \right] = 0,10475 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

➤ Διφασικό βραχυκύκλωμα

Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης :

$$I_{2,SW} = \frac{1,1 * U_N}{2 * Z_{\sigma\lambda}} = \frac{1,1 * 20 * 10^3}{2 * 22,66} = 0,485 \text{ } kA$$

Διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης :

Για το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης, ο συντελεστής μd θα πάρει την μικρότερη και μεγαλύτερη δυνατή τιμή του, δηλαδή 0,35 (καλύτερη περίπτωση) και 1 (χειρότερη περίπτωση). Επομένως:

$$I_{2,d1} = 0,35 * I_{2,SW} = 0,35 * 0,485 = 0,169 \text{ } kA$$

$$I_{2,d2} = 1 * I_{2,SW} = 1 * 0,485 = 0,485 \text{ } kA$$

Αύξηση θερμοκρασίας του αγωγού :

Η διαφορά θερμοκρασίας στον αγωγό (σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) κατά την εκδήλωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, όταν $\mu d = 0,35$, είναι:

1^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,1} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d1}^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d1}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,091^2 * 10^6 * \left[0,15 + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,169} \right)^2 \right] \\ &= 0,02338 \text{ } C^o\end{aligned}$$

2^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,2} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d1}^2 * \left[t * \sqrt{2} + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d1}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,091^2 * 10^6 * \left[0,15 * \sqrt{2} + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,169} \right)^2 \right] = 0,02367 \text{ } C^o\end{aligned}$$

3^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 0,35$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,3} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d1}^2 * \left[t * 2 + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d1}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,091^2 * 10^6 * \left[0,15 * 2 + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,169} \right)^2 \right] \\ &= 0,02407 \text{ } C^o\end{aligned}$$

Αντίστοιχα, η διαφορά θερμοκρασίας στον αγωγό (σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) κατά την εκδήλωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος, όταν $\mu d = 1$, είναι :

1^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,1} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d2}^2 * \left[t + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d2}} \right)^2 \right] = \frac{0,0135}{156^2} * 0,485^2 * 10^6 * \left[0,15 + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,485} \right)^2 \right] \\ &= 0,09786 \text{ } C^o\end{aligned}$$

2^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,2} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d2}^2 * \left[t * \sqrt{2} + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d2}} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,485^2 * 10^6 * \left[0,15 * \sqrt{2} + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,485} \right)^2 \right] = 0,10597 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

3^{ος} κύκλος λειτουργίας, όταν $\mu d = 1$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{2,3} &= \frac{\kappa}{A^2} * I_{2,d2}^2 * \left[t * 2 + T * \left(\frac{I_{2,SW}}{I_{2,d2}} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{0,0135}{156^2} * 0,485^2 * 10^6 * \left[0,15 * 2 + 0,6 * \left(\frac{0,485}{0,485} \right)^2 \right] = 0,11744 \text{ } C^\circ\end{aligned}$$

4.3 Πειραματικές διερευνήσεις σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

4.3.1 Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης[19]

Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά η προστασία μιας γραμμής χαμηλής τάσης, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη:

$$I_d \geq 3 * I_F \quad (4.17)$$

όπου I_d το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης και I_F το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας της γραμμής. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) και πρέπει να ισχύει προκειμένου να εφαρμοστεί η γείωση του ουδετέρου σαν μέθοδος προστασίας έναντι τάσεων επαφής.

Όταν σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης υπάρχει μονοφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου, σε απόσταση l από το μετασχηματιστή διανομής, τότε η συνολική αντίσταση Z του κυκλώματος θα είναι:

$$Z = \sqrt{(R_M + R_T)^2 + (X_M + X_T)^2} \quad (4.18)$$

όπου R_M η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή, X_M επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή, R_Γ η ωμική αντίσταση του αγωγού και X_Γ η επαγωγική αντίσταση του αγωγού μέχρι την θέση βραχυκύκλωσης.

Επομένως για το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης ισχύει η σχέση

$$I_d = \frac{U}{Z} \quad (4.19)$$

Μετά την αντικατάσταση των ωμικών αντιστάσεων R_Γ και επαγωγικών X_Γ με τις αντίστοιχες ωμικές r_Γ και επαγωγικές x_Γ αντιστάσεις ανά μονάδα μήκους αγωγού, η ανίσωση 4.17 γράφεται:

$$\frac{U}{3 * I_F} \geq \sqrt{(R_M + r_\Gamma * l)^2 + (X_M + x_\Gamma * l)^2}$$

ή

$$l^2 + 2 * l * \frac{R_M * r_\Gamma + X_M * x_\Gamma}{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2} - \left(\frac{U}{3 * I_F * \sqrt{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2}} \right)^2 + \frac{R_M^2 + X_M^2}{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2} \leq 0 \quad (4.20)$$

Από την ανισότητα 4.20 προκύπτει η ακόλουθη μέγιστη τιμή L για το l :

$$L = \frac{R_M * r_\Gamma + X_M * x_\Gamma}{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2} + \sqrt{\left(\frac{U}{3 * I_F * \sqrt{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2}} \right)^2 - \left(\frac{r_\Gamma * X_M - x_\Gamma * R_M}{r_\Gamma^2 + x_\Gamma^2} \right)^2} \quad (4.21)$$

Σημειώνεται ότι η σχέση 4.21 ισχύει για βραχυκυκλώματα προς γη. Για βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών, το μήκος πρέπει να γίνει διπλάσιο ($2L$). Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση 4.21 για τις αντίστοιχες τιμές των ωμικών (r_Γ) και επαγωγικών (x_Γ) αντιστάσεων ανά μέτρο γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης (βλέπε πίνακα 4.7 αλλά και των ωμικών (R_M) και επαγωγικών (X_M) αντιστάσεων των μετασχηματιστών διανομής που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (βλέπε πίνακα 4.8), με τις αντίστοιχες ασφάλειές τους (I_F), προκύπτουν οι πίνακες 4.9 και 4.10, που περιέχουν τα μέγιστα μήκη (L) γραμμών χαμηλής τάσης για τα οποία ισχύει η συνθήκη 4.17.

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	r_{Γ} [mΩ/km]	x_{Γ} [mΩ/km]
Γυμνοί αγωγοί 4x 16 mm ²	1140	330
Γυμνοί αγωγοί 4x 35 mm ²	533	306
Γυμνοί αγωγοί 4x 50 mm ²	381	294
Γυμνοί αγωγοί 4x 70 mm ²	277	284
Συνεστραμμένα καλώδια 3x35 mm ² + 54,6 mm ²	868 + 630	100
Συνεστραμμένα καλώδια 3x70 mm ² + 54,6 mm ²	443 + 630	100

Πίνακας 4.7: Ωμικές (r_{Γ}) και επαγωγικές αντιστάσεις (x_{Γ}) ανά km εναερίων αγωγών γραμμών χαμηλής τάσης (η διατομή αφορά ισοδύναμη χαλκού)

P_N (kVA)	25	50	75	100	150	200	250	400	630	750	1000
R_M (mΩ)	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	3,6	3	2,2
X_M (mΩ)	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	10,8	9,1	6,9

Πίνακας 4.8: Ωμικές (R_M) και επαγωγικές αντιστάσεις (X_M) μετασχηματιστών διανομής αναλόγως της ονομαστικής ισχύος P_N

Στους πίνακες 4.9 και 4.10 δίνονται δύο μήκη, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μήκος αφορά την γραμμή χωρίς το καλώδιο παροχής και το μικρότερο μήκος τη γραμμή με το καλώδιο παροχής (συγκεντρικό καλώδιο μήκους 30 m προς τον καταναλωτή).

Σε περίπτωση που μία γραμμή αποτελείται από γυμνούς αγωγούς διαφορετικών διατομών, τότε το ισοδύναμο μήκος της γραμμής βρίσκεται με μετατροπή των επιμέρους αγωγών σε ένα είδος αγωγού σταθερής διατομής.

Ισχύς kVA	Ασ- φά- λεια A	Γυμνοί αγωγοί 16 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 35 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 50 mm ²	Γυμνοί αγωγοί 70 mm ²	Συνεστραμ- μένο καλώδιο 3x35+54,6 mm ²	Συνεστραμ- μένο καλώδιο 3x70+54,6 mm ²
Μήκος γραμμής σε m							
15	25	1030 950					
	32	760 690					
25	32	850 770					
	40	660 580				1000 380	
50	50	560 480	1070 930			840 720	1130 1010
	63	440 360	830 690	1090 920		660 540	920 750
	80	330 250	630 490	830 660	1010 820	500 380	700 530
75	63	450 370	870 730	1140 970		680 560	950 780
	80	350 270	670 530	880 710	1080 880	530 410	740 570
	100	280 200	530 380	690 510	840 640	420 300	580 410
	125	220 140	410 270	530 360	650 450	330 210	450 290
100	63	460 380	890 750	1160 990		690 570	970 800
	80	360 280	690 550	900 730	1110 910	540 420	760 580
	100	280 210	540 400	710 530	870 670	430 310	600 430
	125	220 150	420 270	550 380	680 480	340 220	470 300
	160	170 90	320 180	420 240	510 310	260 140	360 190
150- 160- 200	80	370 290	710 570	940 760	1150 950	550 430	770 600
	100	300 210	570 420	740 560	910 710	440 320	610 440
	125	230 150	450 300	590 410	720 510	350 230	480 320
	160	180 100	350 200	450 270	560 340	270 150	370 210
	200		270 130	360 170	440 220	210 90	300 130
	250		210 70	280 90	340 110		230 70

Πίνακας 4.9: Πίνακας μηκών εναερίων αγωγών χαμηλής τάσης για την τήρηση της συνθήκης ουδετέρωσης ανάλογα με τις τιμές ασφαλειών του δικτύου χαμηλής τάσης (400V/230V) και τις τιμές μετασχηματιστών 15÷200 kVA (σύμφωνα με την Οδηγία Διανομής Νο22[38]). Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων υπολογίστηκαν σε θερμοκρασία 35 °C.

Ισχύς	Ασ- φά- λεια	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Γυμνοί αγωγοί	Συνεστραμ- μένο καλώδιο	Συνεστραμ- μένο καλώδιο
kVA	A	16 mm ²	35 mm ²	50 mm ²	70 mm ²	3x35+54,6 mm ²	3x70+54,6 mm ²
Μήκος γραμμής σε m							
250- 400	80	370 290	720 580	960 770	1170 970	560 440	780 610
	100	300 220	580 480	760 580	940 730	450 330	620 460
	125	240 160	460 310	600 420	740 540	360 240	500 330
	160	180 110	360 210	470 280	580 360	280 160	400 220
500- 630	200		280 140	370 180	460 240	220 100	310 140
	250		230 80	300 100	360 140		250 80
750- 1000	315			230 40	280 50		
	400				220		
	500						

Πίνακας 4.10: Πίνακας μηκών εναερίων αγωγών χαμηλής τάσης για την τήρηση της συνθήκης ουδετέρωσης ανάλογα με τις τιμές ασφαλειών του δικτύου χαμηλής τάσης (400V/230V) και τις τιμές μετασχηματιστών 250÷1000 kVA (σύμφωνα με την Οδηγία Διανομής Νο22[38]). Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων υπολογίστηκαν σε θερμοκρασία 35 °C

Σε περίπτωση που μία γραμμή αποτελείται από γυμνούς αγωγούς διαφορετικών διατομών, τότε το ισοδύναμο μήκος της γραμμής βρίσκεται με μετατροπή των επιμέρους αγωγών σε ένα είδος αγωγού σταθερής διατομής. Για τη μετατροπή α μέτρων αγωγού αντίστασης Z_a (σε Ω/km) σε αντίσταση Z_β (σε Ω/km) ισχύει η σχέση:

$$\beta = \alpha (Z_a/Z_\beta) \quad (4.23)$$

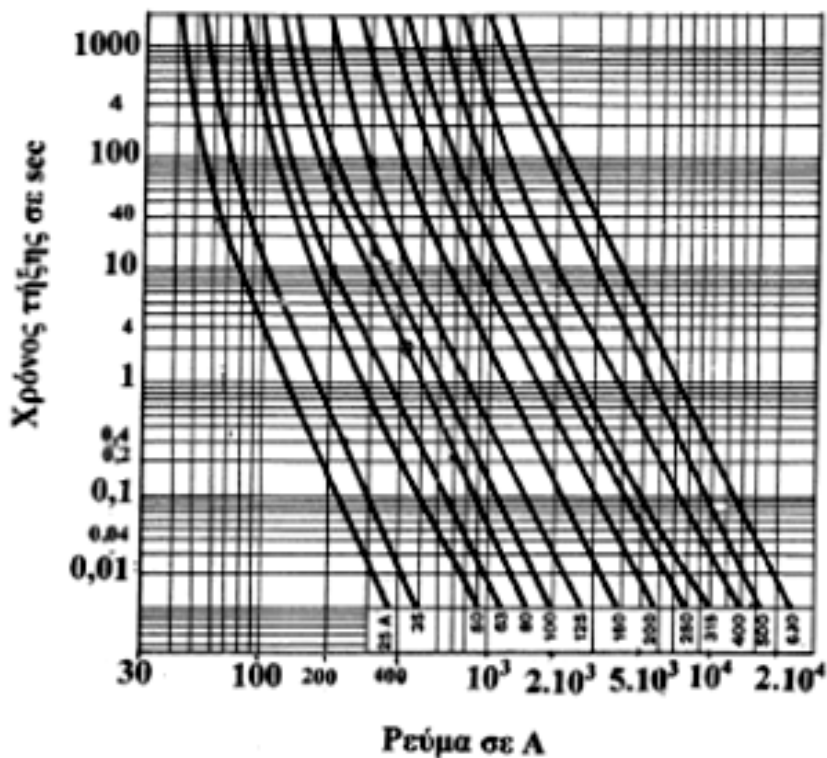
Στον πίνακα 4.11 δίνεται το πηλίκο Z_a/Z_β για γυμνούς αγωγούς και συγκεντρικά καλώδια.

Διατομή γυμνού αγωγού Cu ή ισοδύναμου Al	16 mm ² (Z _β =2,570 Ω/km)	35 mm ² (Z _β =1,310 Ω/km)	50 mm ² (Z _β =0,967 Ω/km)	70 mm ² (Z _β =0,797 Ω/km)
16 mm ² (Z _α =2,570 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,962	Z _α /Z _β = 2,658	Z _α /Z _β = 3,224
35 mm ² (Z _α =1,310 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,509	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,355	Z _α /Z _β = 1,644
50 mm ² (Z _α =0,967 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,376	Z _α /Z _β = 0,738	Z _α /Z _β = 1,000	Z _α /Z _β = 1,213
70 mm ² (Z _α =0,797 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,310	Z _α /Z _β = 0,608	Z _α /Z _β = 0,824	Z _α /Z _β = 1,000
Διατομή συγκεντρικού καλωδίου Cu				
6 mm ² (Z _α =7,754 Ω/km)	Z _α /Z _β = 3,017	Z _α /Z _β = 5,917	Z _α /Z _β = 8,020	Z _α /Z _β = 9,730
10 mm ² (Z _α =4,334 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,685	Z _α /Z _β = 3,307	Z _α /Z _β = 4,482	Z _α /Z _β = 5,438
16 mm ² (Z _α =2,804 Ω/km)	Z _α /Z _β = 1,091	Z _α /Z _β = 2,140	Z _α /Z _β = 2,900	Z _α /Z _β = 3,518
25 mm ² (Z _α =1,788 Ω/km)	Z _α /Z _β = 0,695	Z _α /Z _β = 1,364	Z _α /Z _β = 1,850	Z _α /Z _β = 2,243

Πίνακας 4.11: Τιμές Z_α/Z_β για γυμνούς αγωγούς χαλκού ή ισοδύναμου αλουμινίου και συγκεντρικά καλώδια[15]

Όταν σε μια γραμμή χαμηλής τάσης εφαρμόζονται οι πίνακες 4.10 και 4.11 τότε ισχύει η συνθήκη βραχυκύκλωσης, σύμφωνα με την οποία, κατά το βραχυκύκλωμα συμβαίνει ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) η τήξη της ασφάλειας και ως εκ τούτου οι αγωγοί θερμαίνονται μόνο μερικούς βαθμούς Κελσίου και συνεπώς δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από αυτούς. Η ακαριαία τήξη της ασφάλειας επιβεβαιώνεται από το γεγονός, ότι η συνολική αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης είναι το πολύ 1 Ω με αποτέλεσμα το ρεύμα βραχυκύκλωσης να έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή από 3I_F, που ως εκ τούτου προκαλεί τήξη της ασφάλειας σε χρόνο μικρότερο του 1 s.

Στο ακόλουθο σχήμα δίνονται χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου τήξης ασφαλειών σε πίνακες διανομής χαμηλής τάσης.



Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστικές «ρεύματος - χρόνου τήξεις» ασφαλειών σε πίνακες διανομής χαμηλής τάσης

Επισημαίνεται ότι από πειραματικές διερευνήσεις, που έχουν γίνει για την συνθήκη ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, έχει διαπιστωθεί ότι όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης δεν δημιουργούνται κατά το βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγών τήγματα μετάλλου, γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ασήμαντη [1, 25, 26, 54]. Σημειώνεται ότι η εν λόγω αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προσεγγιστεί υπολογιστικά ως ακολούθως:

Για την ηλεκτρική ενέργεια W_n στην αντίσταση R του αγωγού, λόγω του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης ενεργού τιμής I_β , ισχύει:

$$W_n = I_\beta^2 * R * t = I_\beta^2 * \rho * \left(\frac{L}{A}\right) * t \quad (4.24)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση και t ο χρόνος βραχυκύκλωσης.

Για μεταβολή της θερμοκρασίας του αγωγού κατά $\Delta\theta$, η αντίστοιχη ενέργεια W_θ είναι:

$$W_{\theta} = V * c * \Delta\theta = A * L * c * \Delta\theta \quad (4.25)$$

όπου V ο όγκος, c η ειδική θερμότητα, A η διατομή του αγωγού και L το μήκος του. Από τις σχέσεις 4.24 και 4.25, για $W_{\eta} \approx W_{\theta}$, έπεται ότι:

$$\Delta\theta = \kappa * I_{\beta}^2 * t / A^2$$

όπου $\kappa = \rho/c$. Για τον χαλκό είναι $\rho = 1/50 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ και $c = 3,44 \text{ Ws} / ^{\circ}\text{C cm}^3$ και επομένως είναι $\kappa=0,0058$. Για το αλουμίνιο αντίστοιχα ότι ισχύει $\kappa=0,0135$

4.4 Αντοχή καλωδίων και αγωγών σε βραχυκύκλωμα

Γενικά

Η αντοχή των αγωγών σε βραχυκυκλώματα καθορίζεται με την παραδοχή ότι επειδή τα βραχυκυκλώματα έχουν μικρή διάρκεια, μέχρι να λειτουργήσουν τα μέσα προστασίας δεν γίνεται αξιόλογη απαγωγή της θερμότητας προς το περιβάλλον και κατά συνέπεια η παραγόμενη θερμότητα διατίθεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού. Για τα βραχυκυκλώματα διάρκειας μέχρι 5 s, ο χρόνος t που απαιτείται ώστε μία ορισμένη ένταση βραχυκυκλώματος να ανυψώσει τη θερμοκρασία των αγωγών από τη μέγιστη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας θ_a μέχρι την οριακή θερμοκρασία θ_t , μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο τύπο:[14]

$$A = K * I_B * t^{1/2} \quad (4.26)$$

Όπου:

$I_B =$ Η ένταση του βραχυκυκλώματος (kA)

t = η διάρκεια του βραχυκυκλώματος (s)

A = η διατομή των αγωγών (mm^2)

K = συντελεστής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αγωγού και από τις θερμοκρασίες θ_a και θ_t στην αρχή και στο τέλος του βραχυκυκλώματος και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$K = K_1 \left[\ln \left(\frac{\theta_t + B_0}{\theta_a + B_0} \right) \right]^{-1/2} \quad (4.27)$$

Όπου K_1 σταθερά που εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και δίνεται από τον τύπο:

$$K_1 = \left[\frac{Q_C \times (B_0 + 20)}{p_{20}} \right]^{-1/2} \quad (4.28)$$

Όπου:

Q_C = Η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου του υλικού του αγωγού ($J/^\circ C * m^3$)

B_0 = το αντίστροφο του θερμοκρασιακού συντελεστή ειδικής αντίστασης στους $0^\circ C$ του αγωγού ($^\circ C$)

P_{20} = η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού στους $20^\circ C$ (Ωm)

Θ_a = η θερμοκρασία του αγωγού κατά την αρχή του βραχυκυκλώματος ($^\circ C$)

Θ_t = η θερμοκρασία του αγωγού κατά το τέλος του βραχυκυκλώματος ($^\circ C$)

Χαρακτηριστικά αγωγών				
Μέγεθος (συμβολισμός)	Μονάδα	Υλικό αγωγού		
		CU	AL	ST
Θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης(α_{20})	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00393	0,00403	0,0045
Ειδική αντίσταση στους 20 $^{\circ}\text{C}$ (ρ_{20})	$\Omega\text{mm}^2/\text{km}$	17,241	28,264	138
$B_0(1) = \frac{1}{\alpha_{20}} - 20$	$^{\circ}\text{C}$	234,5	228	202
Θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου Q_c	$\frac{J}{^{\circ}\text{C} * m^3}$	$3,45 * 10^6$	$2,5 * 10^6$	$3,8 * 10^6$
Σταθερά που εξαρτάται από το υλικό του αγωγού $K_1 = \left[\frac{Q_c(B_0 + 20)}{P_{20}} \right]^{-1/2}$	$\frac{mm^2}{KA * sec^{1/2}}$	4,432	6,750	12,783

Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά αγωγών χαλκού αλουμινίου και ατσαλιού

Υπολογισμός συντελεστή K

Οι αποδεκτές τιμές θερμοκρασιών στην αρχή (θ_a) και στο τέλος (θ_t) του βραχυκυκλώματος για μονωμένους αγωγούς με μόνωση X-LPE είναι 90 °C και 250 °C αντίστοιχα. Ήτοι η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ της αρχικής και της τελικής τιμής της θερμοκρασίας του βραχυκυκλώματος ανέρχεται στους 160 °C. Με βάση τις παραπάνω θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά των αγωγών χαλκού και αλουμινίου (πίνακας 4.12), από τη σχέση 4.27 προκύπτουν οι τιμές του συντελεστή K:

Για τον χαλκό $K = 7$

Για το αλουμίνιο $K = 10,57$

Οι τελική θερμοκρασία βραχυκυκλώματος 250 °C για αγωγούς με μόνωση από X-LPE, θα πρέπει να μειώνεται στους 160 °C στο βαθμό που χρησιμοποιείται η μέθοδος συγκόλλησης από κασσίτερο.

Επίσης, για γυμνούς αγωγούς εναέριων δικτύων οι αποδεκτές θερμοκρασίες στην αρχή (θ_a) και στο τέλος (θ_t) του βραχυκυκλώματος, καθορίζονται ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος μείωσης της μηχανικής αντοχής τους. Η μεν αρχική θερμοκρασία είναι 80 °C η δε τελική είναι 170, 130, 160 για αγωγούς χαλκού, αλουμινίου και ACSR αντίστοιχα. Με βάση τη σχέση 4.27 ο συντελεστής K για τα προαναφερόμενα είδη αγωγών είναι:

Για τον χαλκό $K = 8,84$

Για το αλουμίνιο $K = 17,41$

Για το ACSR $K = 14,28$

Οι τιμές των θερμοκρασιών και του συντελεστή K, τόσο για τους γυμνούς αγωγούς, όσο και για τους μονωμένους αγωγούς εναερίου δικτύου δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα

	Γυμνοί αγωγοί			Μονωμένοι αγωγοί μόνωση X-LPE	
Θερμοκρασία (°C)	Cu	Al	ACSR	Al	Cu
θα	80	80	80	90	90
θτ	170	130	160	250	250
K	8,84	17,41	14,28	10,57	7

Πίνακας 4.13: Τιμές των θερμοκρασιών και του συντελεστή K

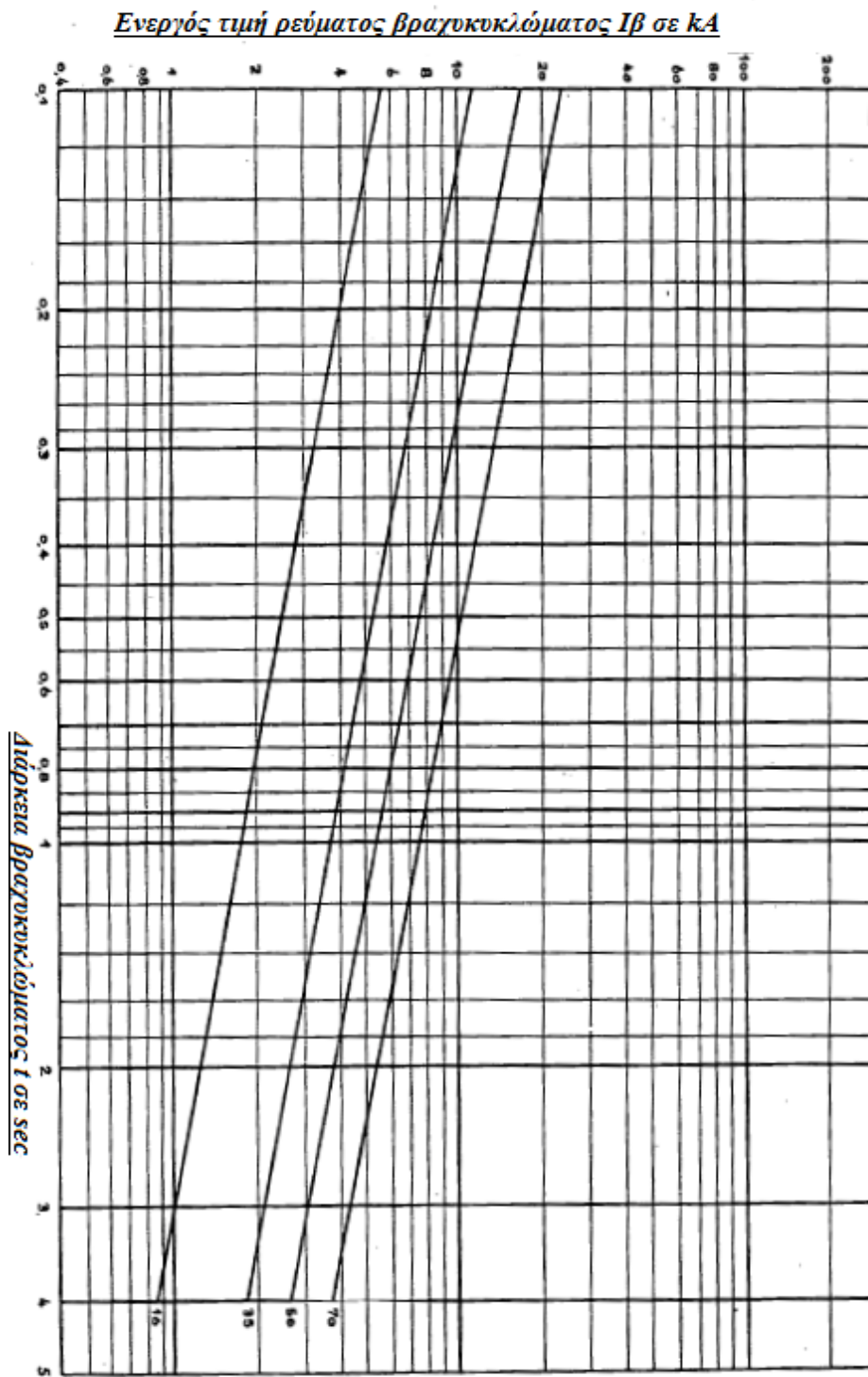
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως $I\beta$ που προκύπτουν από τη σχέση 4.26 σε συνάρτηση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη χρονική διάρκεια t και το είδος του εναερίου αγωγού. Από τον πίνακα αυτό μπορεί να καθορίζεται είτε η απαιτούμενη διατομή A του αγωγού συναρτήσει των $I\beta$ και t , είτε ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος t συναρτήσει των S και $I\beta$.

		ΕΝΑΕΡΙΑ ΔΙΚΤΥΑ												
		ΑΓΩΓΟΙ CU			ΑΓΩΓΟΙ AL			ΑΓΩΓΟΙ ACSR			ΣΚ ΜΤ ΧΛΡΕ		ΣΚ ΧΤ ΧΛΡΕ	
θ_{01} (°C)		80						90						
θ_{r1} (°C)		170						250						
K		8.84						17.41						
A (mm ²)		16	35	50	16	35	50	16	35	95	50	150	70	120
t (sec)		kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0.10		5.8	12.6	17.9	4.9	10.4	15.0	6.6	14.4	38.9	14.1	44.0	20.9	35.0
0.12		5.3	11.5	16.3	4.5	9.5	13.7	6.0	13.2	35.5	12.9	40.2	19.1	32.0
0.14		4.9	10.6	15.1	4.1	8.8	12.7	5.5	12.2	32.9	12.0	37.2	17.7	29.6
0.16		4.5	10.0	14.1	3.9	8.2	11.8	5.2	11.4	30.7	11.2	34.8	16.6	27.7
0.18		4.3	9.4	13.3	3.6	7.7	11.2	4.9	10.7	29.0	10.5	32.8	15.6	26.1
0.20		4.1	8.9	12.6	3.4	7.3	10.6	4.6	10.2	27.5	10.0	31.1	14.8	24.8
0.22		3.9	8.5	12.1	3.3	7.0	10.1	4.4	9.7	26.2	9.5	29.7	14.1	23.6
0.24		3.7	8.1	11.5	3.1	6.7	9.7	4.2	9.3	25.1	9.1	28.4	13.5	22.6
0.26		3.6	7.8	11.1	3.0	6.4	9.3	4.1	8.9	24.1	8.8	27.3	13.0	21.7
0.28		3.4	7.5	10.7	2.9	6.2	8.9	3.9	8.6	23.2	8.5	26.3	12.5	20.9
0.30		3.3	7.3	10.3	2.8	6.0	8.6	3.8	8.3	22.4	8.2	25.4	12.1	20.2
0.32		3.2	7.0	10.0	2.7	5.8	8.4	3.7	8.1	21.7	7.9	24.6	11.7	19.6
0.34		3.1	6.8	9.7	2.6	5.6	8.1	3.6	7.8	21.1	7.7	23.9	11.4	19.0
0.36		3.0	6.6	9.4	2.6	5.5	7.9	3.5	7.6	20.5	7.5	23.2	11.0	18.4
0.38		3.0	6.5	9.2	2.5	5.3	7.7	3.4	7.4	19.9	7.3	22.6	10.7	18.0
0.40		2.9	6.3	8.9	2.4	5.2	7.5	3.3	7.2	19.4	7.1	22.0	10.5	17.5
0.42		2.8	6.1	8.7	2.4	5.1	7.3	3.2	7.0	19.0	6.9	21.5	10.2	17.1
0.44		2.7	6.0	8.5	2.3	4.9	7.1	3.1	6.9	18.5	6.7	21.0	10.0	16.7
0.46		2.7	5.9	8.3	2.3	4.8	7.0	3.1	6.7	18.1	6.6	20.5	9.8	16.3
0.48		2.6	5.7	8.2	2.2	4.7	6.8	3.0	6.6	17.7	6.5	20.1	9.6	16.0
0.50		2.6	5.6	8.0	2.2	4.6	6.7	2.9	6.4	17.4	6.3	19.7	9.4	15.7
0.60		2.3	5.1	7.3	2.0	4.2	6.1	2.7	5.9	15.9	5.8	18.0	8.5	14.3
0.70		2.2	4.8	6.8	1.8	3.9	5.7	2.5	5.4	14.7	5.3	16.6	7.9	13.2
0.80		2.0	4.5	6.3	1.7	3.7	5.3	2.3	5.1	13.7	5.0	15.6	7.4	12.4
0.90		1.9	4.2	6.0	1.6	3.5	5.0	2.2	4.8	13.0	4.7	14.7	7.0	11.7
1.00		1.8	4.0	5.7	1.5	3.3	4.7	2.1	4.6	12.3	4.5	13.9	6.6	11.1
1.50		1.5	3.3	4.6	1.3	2.7	3.9	1.7	3.7	10.0	3.7	11.4	5.4	9.0
2.00		1.3	2.8	4.0	1.1	2.3	3.3	1.5	3.2	8.7	3.2	9.8	4.7	7.8
2.50		1.2	2.5	3.6	1.0	2.1	3.0	1.3	2.9	7.8	2.8	8.8	4.2	7.0
3.00		1.1	2.3	3.3	0.9	1.9	2.7	1.2	2.6	7.1	2.6	8.0	3.8	6.4
3.50		1.0	2.1	3.0	0.8	1.8	2.5	1.1	2.4	6.6	2.4	7.4	3.5	5.9
4.00		0.9	2.0	2.8	0.8	1.6	2.4	1.0	2.3	6.1	2.2	7.0	3.3	5.5
4.50		0.9	1.9	2.7	0.7	1.5	2.2	1.0	2.1	5.8	2.1	6.6	3.1	5.2
5.00		0.8	1.8	2.5	0.7	1.5	2.1	0.9	2.0	5.5	2.0	6.2	3.0	5.0

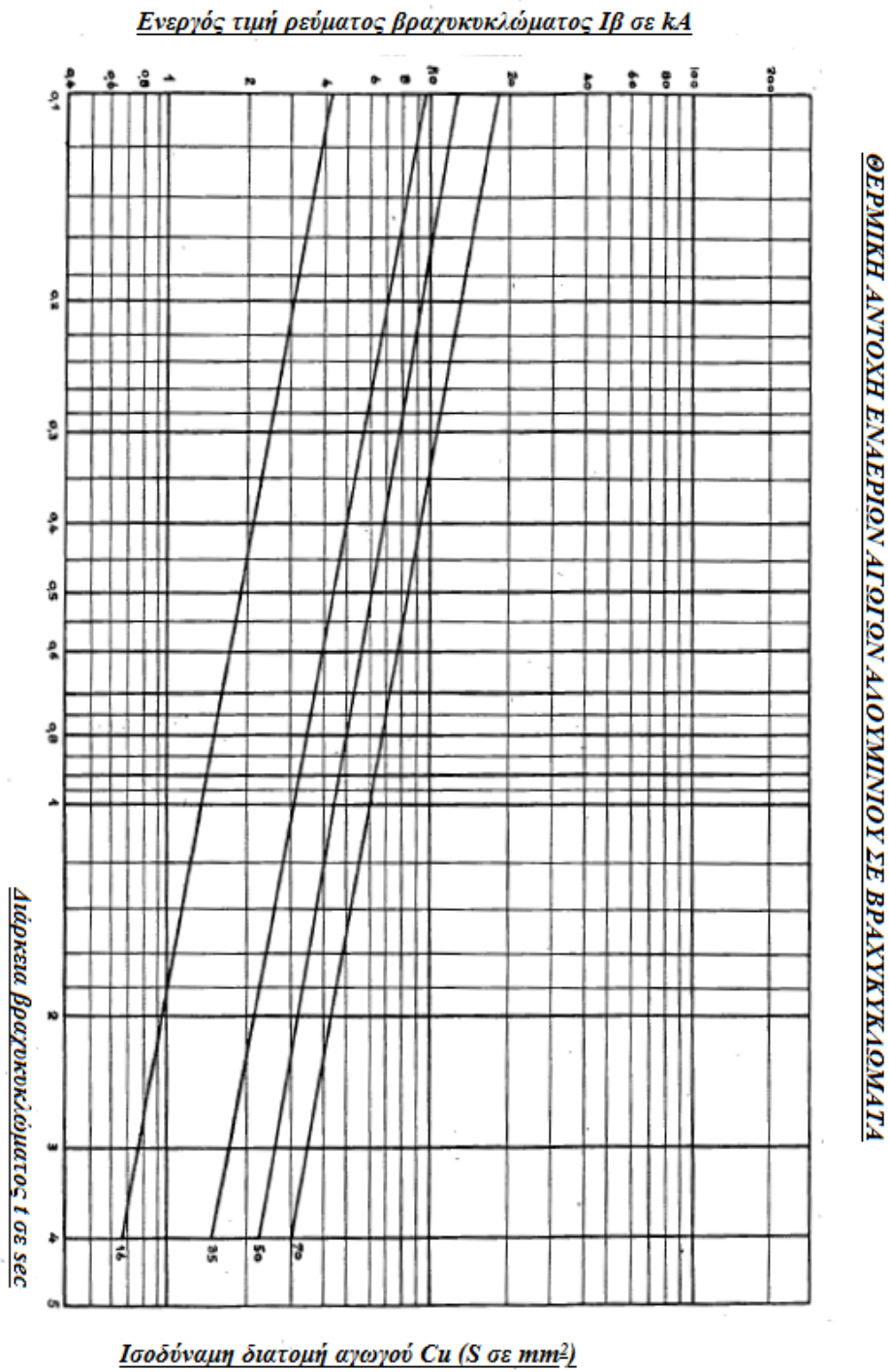
Πίνακας 4.14: Διατομή A του αγωγού συναρτήσει των $I\beta$ και t [12]

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται ενδεικτικά η γραφική παράσταση της διατομής A γυμνών εναερίων αγωγών χαλκού, αλουμινίου και ACSR σε συνάρτηση με την ένταση βραχυκυκλώματος $I\beta$ και τη μέγιστη επιτρεπόμενη χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος t .

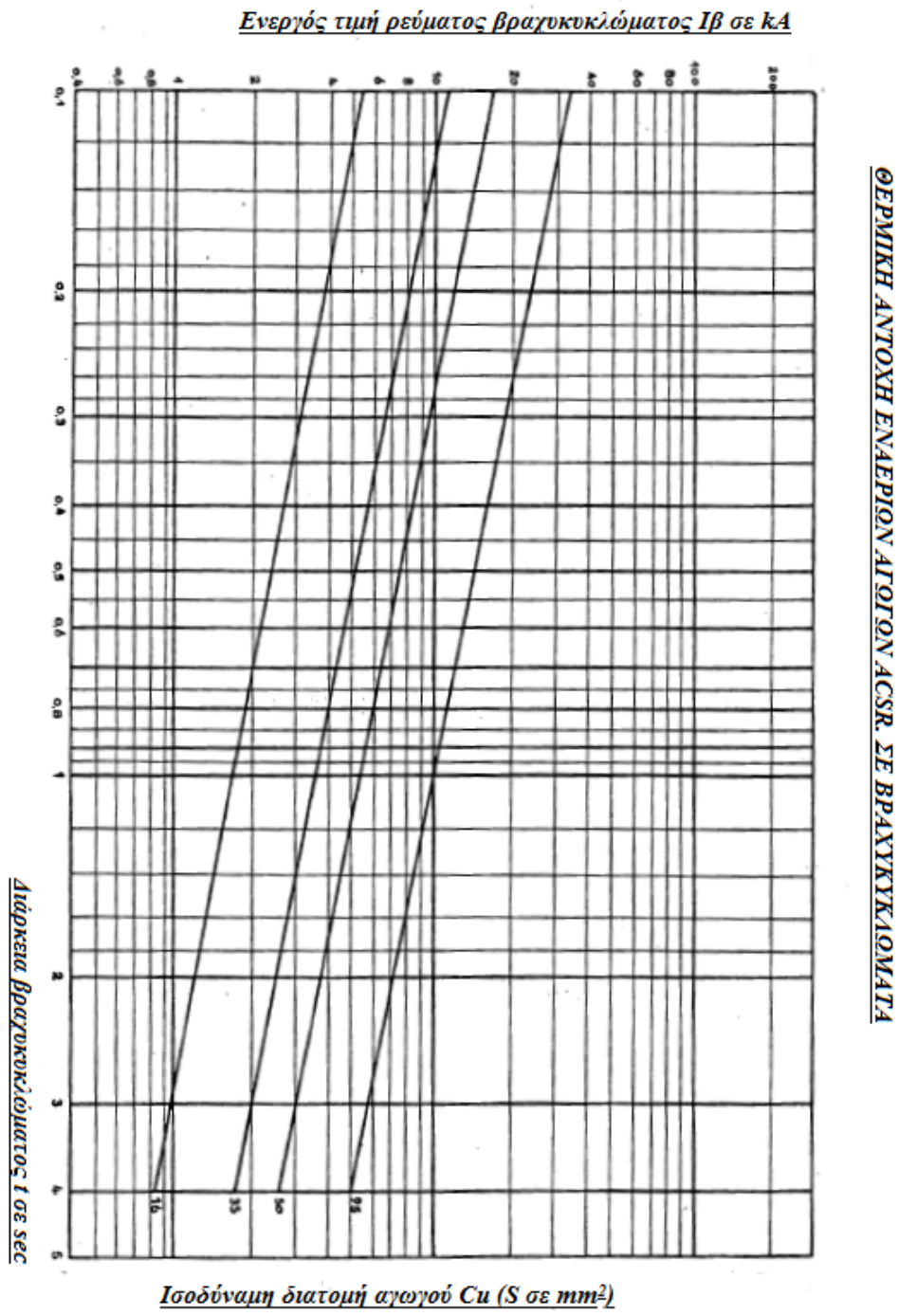
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΣΕ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ



Σχήμα4.10:Θερμική αντοχή εναερίων αγωγών χαλκού σε βραχυκυκλώματα[14]



Σχήμα 4.11:Θερμική αντοχή εναερίων αγωγών αλουμινίου σε βραχυκυκλώματα[14]



Σχήμα 4.12:Θερμική αντοχή εναερίων αγωγών ACSR σε βραχυκυκλώματα[14]

Σε περίπτωση αγωγού, που προστατεύεται από διακόπτη που εκτελεί αυτόματες επαναφορές (με παρεμβολή ενδεχομένως διακόπτη απομόνωσης) σαν διάρκεια της έντασης βραχυκυκλώματος θεωρείται ο αθροιστικός χρόνος μέχρι την οριστική διακοπή του βραχυκυκλώματος από προτεταγμένο μέσο προστασίας. Συχνά οι εναέριοι αγωγοί δεν φορτίζονται μέχρι την μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση επειδή είτε το κριτήριο της πτώσης τάσης, είτε το κριτήριο της μηχανικής αντοχής οδηγεί σε αγωγούς μεγαλύτερης διατομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

“ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ”

Η επίλυση δικτύων ΜΤ όσο αναφορά τη ροή φορτίου, τη φόρτιση των αγωγών και τη μελέτη προστασίας (υπολογισμός των διαφόρων ειδών βραχυκυκλωμάτων), επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μηχανογραφικών προγραμμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα κύρια στοιχεία για την εκπόνηση μιας μελέτης προστασίας εναερίου δικτύου διανομής ΜΤ καθώς και ενδεικτικά παραδείγματα για τη μελέτη αυτή μέσω μηχανογραφικού προγράμματος.

Μία μελέτη προστασίας αποσκοπεί στη ρύθμιση των μέσων προστασίας ώστε να συνεργάζονται μεταξύ τους, να επιτυγχάνουν δηλαδή την όσο το δυνατό ταχύτερη διακοπή τροφοδότησης ενός σφάλματος, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα την ελάχιστη δυνατή διακοπή τροφοδότησης σε υγιή τμήματα του δικτύου.

Για το σκοπό αυτό είναι επιθυμητή η καλή συνεργασία των συστημάτων προστασίας των δικτύων διανομής με τα συστήματα προστασίας των εγκαταστάσεων τροφοδοσίας.

Όπως έχει προαναφερθεί στη παράγραφο 4.1, τα σφάλματα διακρίνονται σε παροδικά και μόνιμα ανάλογα του χρόνου παραμονής τους στα δίκτυα διανομής. Επίσης, διακρίνονται σε σφάλματα μεταξύ φάσεων και σφάλματα μεταξύ φάσεως και γης.

Το εναέριο δίκτυο μίας γραμμής μέσης τάσης είναι κατά κανόνα ακτινικό. Αποτελείται δηλαδή από:

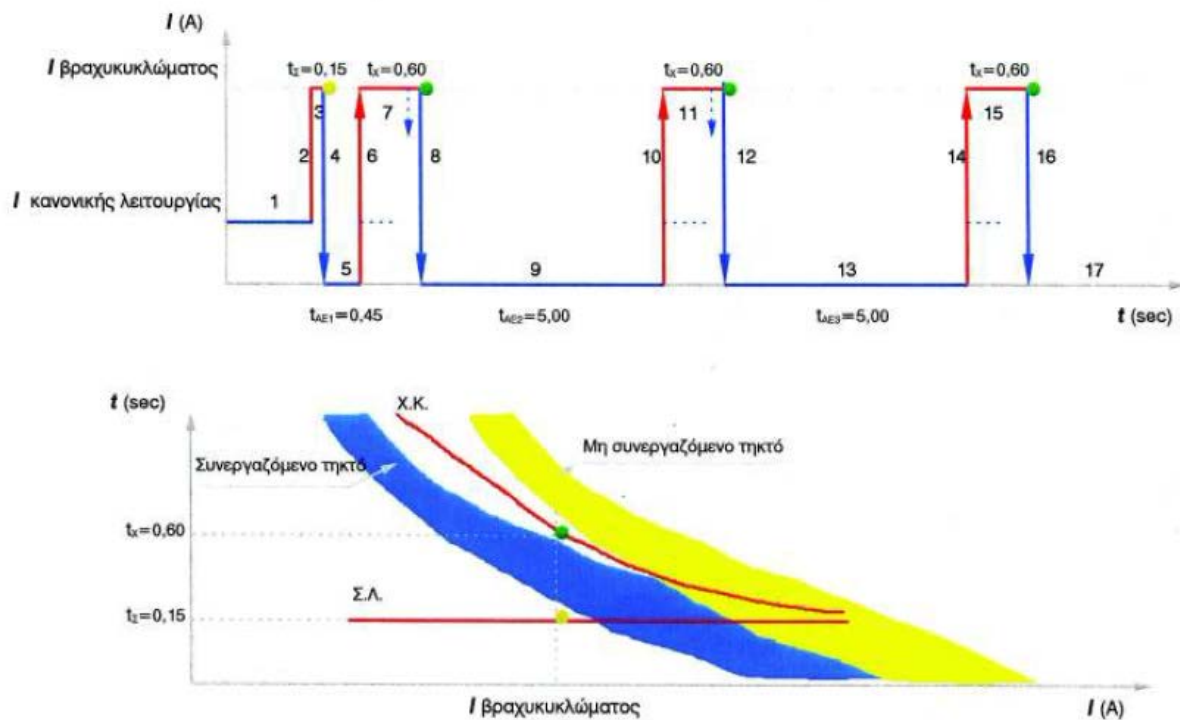
- Τον κορμό, που επιτηρείται και προστατεύεται από ΔΙ στην αρχή της γραμμής, ευρισκόμενο εντός κυψέλης του Υ/Σ (μερικές φορές τοποθετείται ΔΑΕ αντί του ΔΙ). Ο κορμός είναι πιθανό να διακόπτεται από ΔΑΕ σε θέση που ορίζει η μελέτη προστασίας. Ο ΔΑΕ επιτηρεί και προστατεύει αυτόνομα το τμήμα του κορμού που βρίσκεται μετά από αυτόν, ανεξάρτητα από τη λειτουργία του ΔΙ.
- Τις διακλαδώσεις και υποδιακλαδώσεις που είναι τμήματα του δικτύου προστατευόμενα στην αρχή τους από τηκτό ή ΔΑ.

5.1 Λειτουργία προστασίας εναερίων δικτύων Μέσης Τάσης

Λόγω της αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων στα εναέρια δίκτυα Μέσης Τάσης, εφαρμόζεται η λειτουργία των ηλεκτρονόμων του διακόπτη της αναχώρησης σε διαδοχικούς κύκλους (2 ή 3) λειτουργιών διακοπής – επαναφοράς, καταρχήν στιγμιαίας και εν συνεχεία με χρονική καθυστέρηση. Ως εκ τούτου δίνεται η ευκαιρία τα σφάλματα να εξαλειφθούν μόνα τους είτε να απομονωθούν χάρη στη λειτουργία είτε των τηκτών είτε των ΔΑ, οι οποίοι αξιοποιούν ακριβώς αυτό το χαρακτηριστικό των διαδοχικών κύκλων διακοπών – επαναφορών για να απομονώσουν σφάλματα στις διακλαδώσεις στις οποίες είναι εγκατεστημένοι.

Προκειμένου να μελετηθούν οι χρόνοι αντίδρασης του κάθε μέσου προστασίας στα διάφορα σφάλματα, χρησιμοποιούνται διαγράμματα χαρακτηριστικών καμπυλών αντιστρόφου χρόνου ($I - t$) σε λογαριθμική κλίμακα.

Ακολούθως, παρουσιάζεται ενδεικτικά παράδειγμα της λειτουργίας της προστασίας ΔΙ με τρεις επαναλαμβανόμενους κύκλους διακοπών – επαναφορών.



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα κύκλου ΔΙ (ή ΔΑΕ)

Συνομογραφίες:

H/N ΣΛ = Ηλεκτρονόμος στιγμιαίας λειτουργίας

H/N ΧΚ = Ηλεκτρονόμος χρονικής καθυστέρησης

H/N ΑΕ = Ηλεκτρονόμος αυτόματου επαναφοράς

ΔΑΕ = Διακόπτης αυτομάτου επαναφοράς

ΔΑ = Διακόπτης απομόνωσης

Παράδειγμα κύκλου ΔΙ:

1. Κανονική λειτουργία της γραμμής
2. Σε αυτή τη χρονική στιγμή συμβαίνει βραχυκύκλωμα σε κάποιο σημείο του δικτύου (I_{BRAX}).
3. Διεγείρεται ο H/N Σ.Λ. Τροφοδοτείται το βραχυκύκλωμα για $t_c = 0,15$ s μέχρι να δώσει εντολή πτώσης ο H/N Σ.Λ.
4. Ο H/N Σ.Λ. δίνει εντολή στο πηνίο OFF του ΔΙ και ο ΔΙ ανοίγει κόβοντας το βραχυκύκλωμα. Σε αυτό το στάδιο διακόπτονται τα παροδικά σφάλματα.

5. Ο Η/Ν Α.Ε. σύμφωνα με τη ρύθμισή του, μετράει $t_{AE1} = 0,45$ s με ανοιχτό τον ΔΙ. Ήδη έχει συμπληρωθεί ένας κύκλος υπερέντασης - διακοπής (2-4). Σημειώνεται ότι εάν στα ανάντη του σφάλματος είναι τοποθετημένος ΔΑ, με ρύθμιση για έναν κύκλο, στη διάρκεια αυτού του χρόνου (χωρίς φορτίο) ο ΔΑ ανοίγει και απομονώνει το σφάλμα.
6. Ο Η/Ν Α.Ε. δίνει εντολή στο πηνίο ΟΝ του ΔΙ (1^η στιγμιαία αυτόματη επαναφορά) και ο ΔΙ κλείνει επανατροφοδοτώντας το βραχυκύκλωμα. Εκτός εάν μεσολάβησε ΔΑ με ρύθμιση για έναν κύκλο ώστε να απομονώσει το σφάλμα και ως εκ τούτου να διακοπεί η εκτέλεση του κύκλου και η γραμμή να τροφοδοτείται με το κανονικό ρεύμα λειτουργίας (1).
7. Μετά τη λειτουργία του, ο Η/Ν Σ.Λ. δεσμεύεται. Έτσι τώρα διεγείρεται ο Η/Ν Χ.Κ. Για $t_x = 0,60$ s τροφοδοτείται το βραχυκύκλωμα μέχρι να δώσει εντολή πτώσης ο Η/Ν Χ.Κ. Σημειώνεται ότι για ημιμόνιμο σφάλμα εάν στα ανάντη του βραχυκυκλώματος έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα τηκτά που να συνεργάζονται, αυτά θα λειτουργήσουν και θα απομονώσουν το σφάλμα. Σε τέτοια περίπτωση, πριν συμπληρωθεί ο $t_x = 0,60$ s διακόπτεται ο εκτελούμενος κύκλος και επανερχόμαστε στο ρεύμα Ι κανονικής λειτουργίας (1). Αν δεν μεσολαβήσουν τηκτά ή αν έχουν τοποθετηθεί τηκτά που δεν συνεργάζονται ο κύκλος συνεχίζεται.
8. Ο Η/Ν Χ.Κ. δίνει εντολή στο πηνίο OFF του ΔΙ και ο ΔΙ ανοίγει κόβοντας το βραχυκύκλωμα.
9. Ο Η/Ν Α.Ε. σύμφωνα με τη ρύθμισή του, μετράει $t_{AE2} = 5$ s με ανοιχτό τον ΔΙ. Ήδη, έχουν συμπληρωθεί δύο κύκλοι υπερέντασης - διακοπής (2-4, 6-8), οπότε εάν στα ανάντη του σφάλματος είναι τοποθετημένος ο ΔΑ με ρύθμιση στους δύο κύκλους, στη διάρκεια αυτού του χρόνου (χωρίς φορτίο) ο ΔΑ ανοίγει και απομονώνει το σφάλμα.
10. Εάν ο Η/Ν Α.Ε. έχει ρυθμιστεί και με δεύτερη χρονική αυτόματη επαναφορά, ο Η/Ν Α.Ε. δίνει εντολή στο πηνίο ΟΝ του ΔΙ και ο ΔΙ κλείνει επανατροφοδοτώντας το βραχυκύκλωμα. Σημειώνεται ότι εάν μεσολάβησε ΔΑ με ρύθμιση για δύο κύκλους και απομόνωσε το σφάλμα, διακόπτεται η εκτέλεση του κύκλου και η γραμμή τροφοδοτεί το κανονικό ρεύμα λειτουργίας (1).
11. Διεγείρεται και πάλι ο Η/Ν Χ.Κ. Για $t_x = 0,60$ s τροφοδοτείται το βραχυκύκλωμα μέχρι να δώσει εντολή πτώσης ο Η/Ν Χ.Κ. Για ημιμόνιμο σφάλμα δίνεται δεύτερη ευκαιρία για τυχόν τηκτά που μεσολαβούν πριν τη βλάβη, ώστε εάν συνεργάζονται να απομονώνουν το σφάλμα. Εάν συμβεί αυτό, πριν συμπληρωθεί ο $t_x = 0,60$ s διακόπτεται ο εκτελούμενος κύκλος και επανερχόμαστε στο ρεύμα Ι κανονικής λειτουργίας (1). Αν δεν μεσολαβούν τηκτά η αν έχουν τοποθετηθεί τηκτά που δεν συνεργάζονται, ο κύκλος συνεχίζεται.
12. Ο Η/Ν Χ.Κ. δίνει εντολή στο πηνίο OFF του ΔΙ και ο ΔΙ ανοίγει κόβοντας το βραχυκύκλωμα.

13. Ότι και το 9. Τώρα έχουν συμπληρωθεί τρεις κύκλοι υπερέντασης - διακοπής (2-4, 6-8, 10-12), οπότε εάν πριν το σφάλμα είναι τοποθετημένος ΔΑ με ρύθμιση στους τρεις κύκλους, στη διάρκεια αυτού του χρόνου (χωρίς φορτίο) ο ΔΑ ανοίγει και απομονώνει το σφάλμα.
14. Αν έχει ρυθμιστεί και τρίτη χρονική αυτόματη επαναφορά, δίνεται νέα εντολή και ξανακλείνει ο ΔΙ τροφοδοτώντας και πάλι το βραχυκύκλωμα. Σημειώνεται ότι αν μεσολάβησε ΔΑ με ρύθμιση στους τρεις κύκλους και απομόνωσε το σφάλμα διακόπτεται η εκτέλεση του κύκλου και η γραμμή τροφοδοτεί το κανονικό ρεύμα λειτουργίας.
15. Αυτή η έκθεση στην υπερένταση είναι σπάνια και οφείλεται ή σε δυσλειτουργία ΔΑ που δεν απομόνωσε το σφάλμα ή σε τηκτά που δεν συνεργάστηκαν ή σε μόνιμο σφάλμα επί του κορμού.
16. Ότι και το 12.
17. Έχει συμπληρωθεί πλήρης κύκλος λειτουργίας και ΔΙ ή ΔΑΕ μένει πλέον εκτός.

5.2 Βασικοί κανόνες προστασίας

Για τα εναέρια δίκτυα διανομής ΜΤ, ακτινικής τροφοδότησης, η ιδανική χρονική αλληλουχία ενεργοποίησης των μέσων προστασίας είναι:

1. Λιώσιμο των τηκτών
2. Άνοιγμα των ΔΙ
3. Θερμική καταστροφή αγωγών ή άνοιγμα ΔΑ

Σχετικά με την περίπτωση (3), επισημαίνεται ότι θα πρέπει να έχουμε υπόψη οι ρυθμίσεις θα πρέπει να ανταποκρίνονται στη προστασία όχι μόνο από ρεύματα βραχυκύκλωσης αλλά και από ρεύματα υπερθέρμανσης των αγωγών και των Μ/Σ εντάσεως.

Όσο αναφορά τις ασφάλειες, γενική αρχή επιλογής μεγέθους ασφάλειας είναι η συνεργασία με τις άλλες ασφάλειες ή μέσα προστασίας. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε βραχυκύκλωμα μετά από μια ασφάλεια προκαλεί τήξη αυτής και καμιάς προηγούμενης .

5.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε μία μελέτη προστασίας

Σχετικά με τη ρύθμιση των προστασιών των γραμμών, ώστε να ανταποκρίνονται σε όσο το δυνατό περισσότερες περιπτώσεις σφαλμάτων μεταξύ φάσεων και σφαλμάτων ως προς γη, απαιτείται η εξέταση της συμπεριφοράς τους για όλες τις πιθανές τιμές ρεύματος.

Για τη διενέργεια μίας μελέτης προστασίας πρέπει πρώτα να υπολογιστούν όλα τα πιθανά βραχυκυκλώματα. Κάθε σφάλμα (βραχυκύκλωμα) χαρακτηρίζεται από 2 παραμέτρους (είδος και θέση). Η τιμή που θα πάρει το ρεύμα, για δεδομένο επίπεδο ονομαστικής τάσης, εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση της πηγής, είτε αυτή πρόκειται για υποσταθμό υποβιβασμού από την υψηλή προς μέση τάση, είτε πρόκειται για μικρότερο σταθμό παραγωγής με μία ή περισσότερες (συνδεδεμένες παράλληλα) σύγχρονες μηχανές, είτε για οποιοδήποτε άλλο είδος πηγής. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, σταθμού παραγωγής με περισσότερες της μίας μηχανών, ο αριθμός των μηχανών που είναι σε λειτουργία επηρεάζει τη συνολική τιμή των παραμέτρων R και X ενώ το ίδιο ισχύει και για τις παραμέτρους των μετασχηματιστών των μηχανών.

5.3.1 Μέγιστα και ελάχιστα ρεύματα H/N

Για την πραγματοποίηση μίας μελέτης προστασίας χρησιμοποιούνται 4 σενάρια. Αφού διαμορφωθούν 4 διαφορετικά αρχεία με τις παραμέτρους της πηγής, θέτοντας ανάλογα με το είδος του βραχυκυκλώματος που επιζητείται να υπολογιστεί, είτε την υπομεταβατική (X'') αντίδραση της πηγής, είτε τη μεταβατική (X'), είτε τη μόνιμη (X), υπολογίζονται τα βραχυκυκλώματα σε όλους τους κόμβους του δικτύου και κρατούνται οι τιμές στις θέσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων προστασίας.

Σχετικά με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των βραχυκυκλωμάτων, σε ένα δεδομένο δίκτυο, ισχύουν τα εξής:

- Το μέγιστο ρεύμα από H/N φάσης (MAX_PHASE) περνάει σε **τριφασικό** βραχυκύκλωμα προς γη στο πιο κοντινό σημείο στην πηγή και υπό μέγιστη παραγωγή, δηλαδή με όλες τις μηχανές σε λειτουργία (όταν πρόκειται για σταθμό παραγωγής).
- Το ελάχιστο ρεύμα από H/N φάσης (MIN_PHASE) περνάει σε **διφασικό** βραχυκύκλωμα στο πιο απομακρυσμένο σημείο από την πηγή και υπό ελάχιστη παραγωγή (όταν πρόκειται για σταθμό παραγωγής).

- Το μέγιστο ρεύμα από H/N γης (MAX_GROUND) περνάει σε **μονοφασικό** βραχυκύκλωμα προς γη στο πιο κοντινό σημείο στην παραγωγή και υπό μέγιστη παραγωγή (όταν πρόκειται για σταθμό παραγωγής).
- Το ελάχιστο ρεύμα από H/N γης (MIN_GROUND) περνάει σε **μονοφασικό** βραχυκύκλωμα προς γη μέσω αντίστασης 40Ω στο πιο απομακρυσμένο σημείο από την πηγή και υπό ελάχιστη παραγωγή. Το ρεύμα αυτό προκύπτει συνήθως γύρω στα 200A.

Το υπό εξέταση δίκτυο μοντελοποιείται σε κατάλληλο λογισμικό με το σύνολο της απαραίτητης πληροφορίας, το οποίο αφορά τα μήκη των αγωγών, την τοπολογία του και το είδος των αγωγών (μοντελοποίηση με βάση τις ανά μονάδα μήκους τιμές της ωμικής, επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης). Επίσης μοντελοποιούνται οι πηγές του δικτύου, με τα ονομαστικά μεγέθη της τάσης των ζυγών, των R και X των μετασχηματιστών και των R και X των μηχανών (σε υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμη κατάσταση) και τη μέγιστη ισχύ για τις δευτερεύουσες πηγές που ενδεχομένως υπάρχουν στο δίκτυο (π.χ. αιολικά πάρκα).

Παρακάτω φαίνονται οι διαμορφώσεις των πηγών για κάθε ένα από τα προηγούμενα 4 σενάρια:

- Για τα μέγιστα ρεύματα φάσης, παίρνουμε τις τιμές για τις σύνθετες αντιστάσεις των πηγών ή του ανάντη δικτύου από την **υπομεταβατική κατάσταση**.
- Για τα μέγιστα ρεύματα γης παίρνουμε, επίσης, τις τιμές για τις σύνθετες αντιστάσεις των πηγών ή του ανάντη δικτύου από την **υπομεταβατική κατάσταση**.
- Για το ελάχιστο ρεύμα φάσης παίρνουμε τις τιμές για τις σύνθετες αντιστάσεις των πηγών ή του ανάντη δικτύου από τη **μεταβατική κατάσταση**.
- Για το ελάχιστο ρεύμα γης παίρνουμε τις τιμές για τις σύνθετες αντιστάσεις των πηγών ή του ανάντη δικτύου από τη **μόνιμη κατάσταση**. Στην περίπτωση αυτή, για να είμαστε στην ασφαλή πλευρά, εφόσον εξετάζουμε μικρά βραχυκυκλώματα και μας ενδιαφέρει η προστασία να λειτουργήσει για όλες τις πιθανές (μικρές) τιμές, επιλέγουμε την αντίσταση γης 40Ω, που λιγότευει επιπλέον την τιμή της έντασης του ρεύματος των βραχυκυκλωμάτων, σε σχέση με την ιδανική περίπτωση της μηδενικής αντίστασης γης.

Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω, δημιουργούνται με τη βοήθεια του λογισμικού της εξομοίωσης 4 διαφορετικές διαμορφώσεις (στιγμιότυπα) του δικτύου.

Για κάθε μία από τις παραπάνω διαμορφώσεις υπολογίζονται τα βραχυκυκλώματα σε όλους τους απεικονισμένους κόμβους του εξεταζόμενου δικτύου, αναζητώντας, κατά περίπτωση τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή (ανάλογα με το αν εξετάζουμε μέγιστο ή ελάχιστο βραχυκύκλωμα). Αν το δίκτυο είναι πολύ μεγάλο, ίσως χρειαστεί και επιμέρους έλεγχος σε τμήματά του, για να εντοπιστεί η θέση του μέγιστου και του ελάχιστου βραχυκυκλώματος σε κάθε υποτήμα.

Στη συνέχεια ρυθμίζονται τα εγκατεστημένα μέσα προστασίας (ξεχωριστά για τους ηλεκτρονόμους σφαλμάτων γης και ξεχωριστά για τους ηλεκτρονόμους φάσεων), ώστε οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας τους που προκύπτουν, να ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες, πάντα για το εύρος πιθανών τιμών σφαλμάτων στο εξεταζόμενο δίκτυο, το οποίο καθορίζεται από τις παραπάνω τέσσερις τιμές (τιμή μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος, τιμή ελάχιστου διφασικού βραχυκυκλώματος, τιμή μέγιστου βραχυκυκλώματος ως προς γη, τιμή ελάχιστου βραχυκυκλώματος ως προς γη).

5.3.2 Ρύθμιση προστασιών ηλεκτρονόμων αναχωρήσεων γραμμών Μ.Τ.

Για τη ρύθμιση των μέσων προστασίας, επιλέγεται το υλικό που θα τοποθετηθεί και στη συνέχεια η χαρακτηριστική καμπύλη από τους ακόλουθους διαθέσιμους τύπους:

Normal Inverse(NI), Very Inverse(VI), Extremely Inverse(EI) και Instantaneous Operation(INST).

Οι απεικονίσεις είναι όλες σε λογαριθμική κλίμακα.

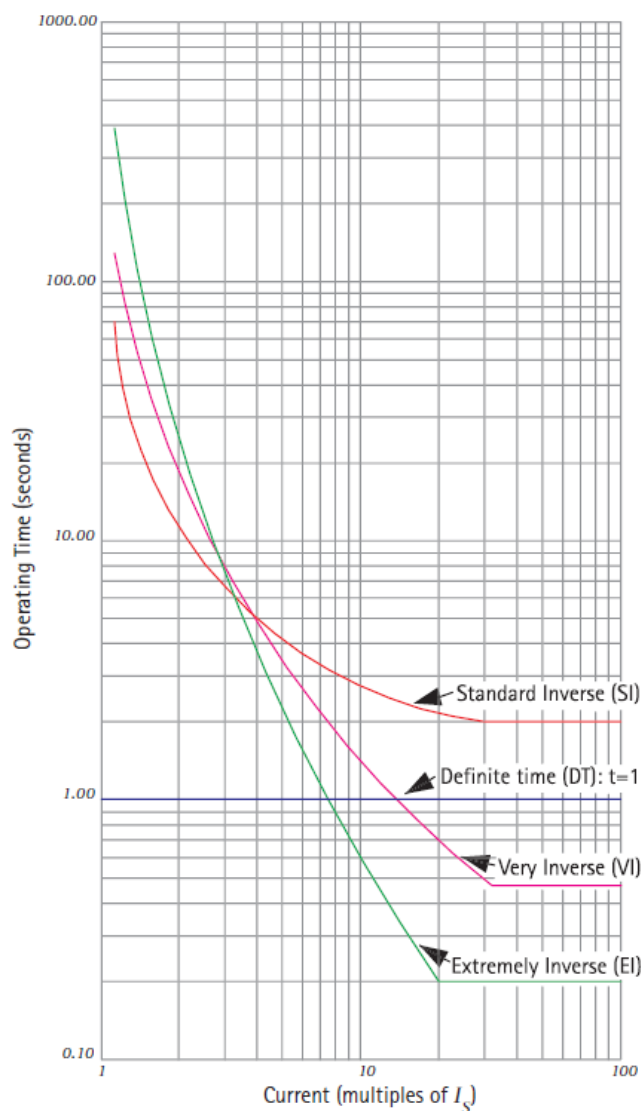
Παρακάτω φαίνονται οι τύποι υπολογισμού για την κάθε οικογένεια καμπυλών, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60255.

Standard Inverse (SI)	$t = TMS \times \frac{0.14}{I_r^{0.02} - 1}$
Very Inverse (VI)	$t = TMS \times \frac{13.5}{I_r - 1}$
Extremely Inverse (EI)	$t = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Long time standard earth fault	$t = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

Σχήμα 5.2: Τύποι υπολογισμού για κάθε οικογένεια καμπυλών (IEC 60255)

TMS είναι το Time Multiplier Setting (σταθερά χρόνου), που ουσιαστικά «μετακινεί την καμπύλη προς τα επάνω, κατά μήκος του άξονα του χρόνου, όσο μεγαλώνει η τιμή του. Ιt είναι ο λόγος I/I_s , όπου I_s είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος.

Ακολουθώς παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές χαρακτηριστικές καμπύλες από την κάθε οικογένεια:



(a) IEC 60255 characteristics ; TMS=1.0

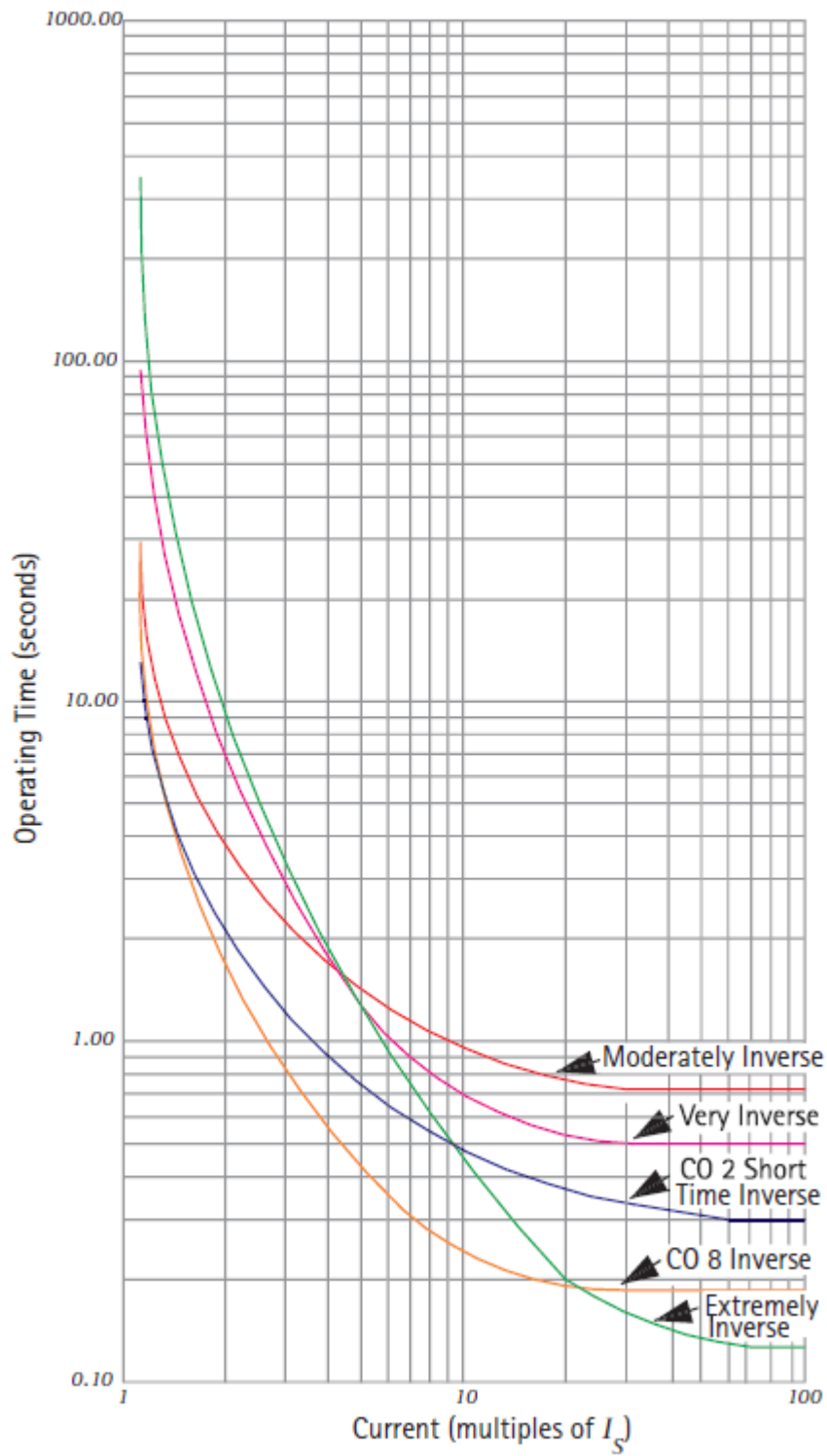
Σχήμα 5.3: Χαρακτηριστική καμπύλη I-t (IEC 60255)

Παρακάτω φαίνονται οι τύποι υπολογισμού κατά IEEE. Όπου TD είναι και πάλι η σταθερά χρόνου (Time Dial).

IEEE Moderately Inverse	$t = \frac{TD}{7} \left\{ \left(\frac{0.0515}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.114 \right\}$
IEEE Very Inverse	$t = \frac{TD}{7} \left\{ \left(\frac{19.61}{I_r^2 - 1} \right) + 0.491 \right\}$
Extremely Inverse (EI)	$t = \frac{TD}{7} \left\{ \left(\frac{28.2}{I_r^2 - 1} \right) + 0.1217 \right\}$
US C08 Inverse	$t = \frac{TD}{7} \left\{ \left(\frac{5.95}{I_r^2 - 1} \right) + 0.18 \right\}$
US C02 Short Time Inverse	$t = \frac{TD}{7} \left\{ \left(\frac{0.02394}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.01694 \right\}$

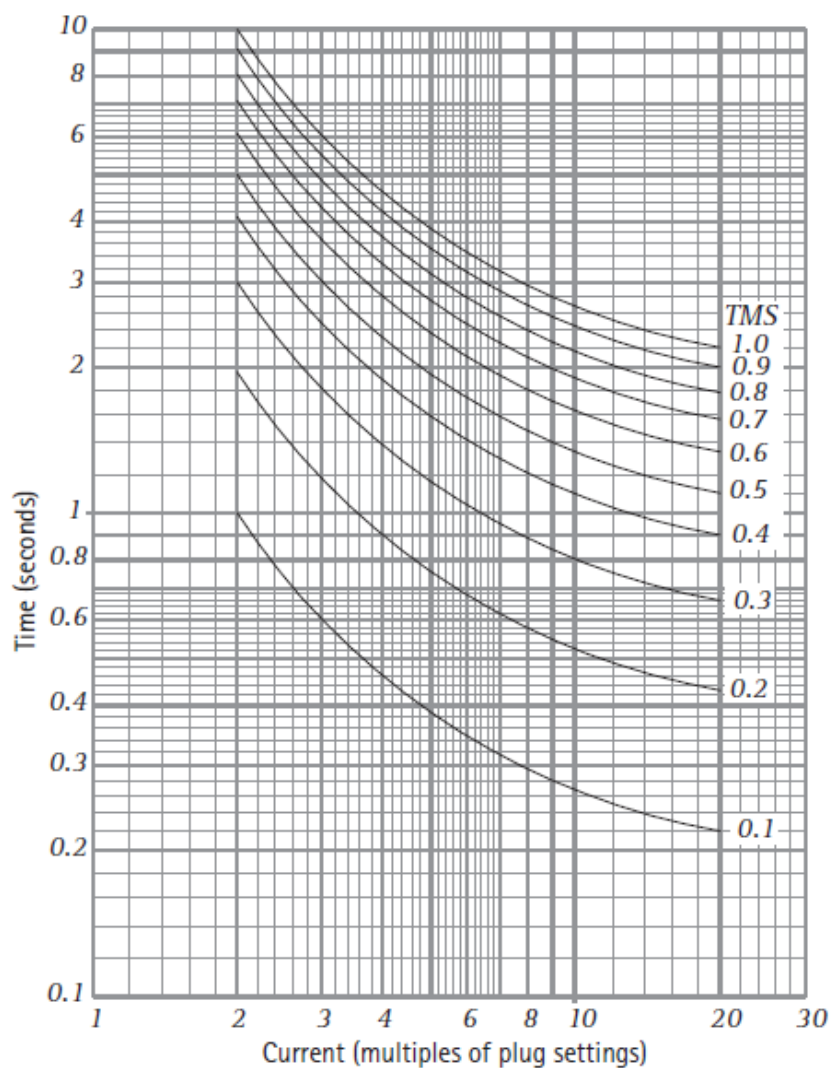
Σχήμα 5.4: Τύποι υπολογισμού για κάθε οικογένεια καμπυλών (IEEE)

Ακολούθως, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές χαρακτηριστικές καμπύλες από την κάθε οικογένεια, κατά IEEE.



Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστική καμπύλη I-t (IEEE)

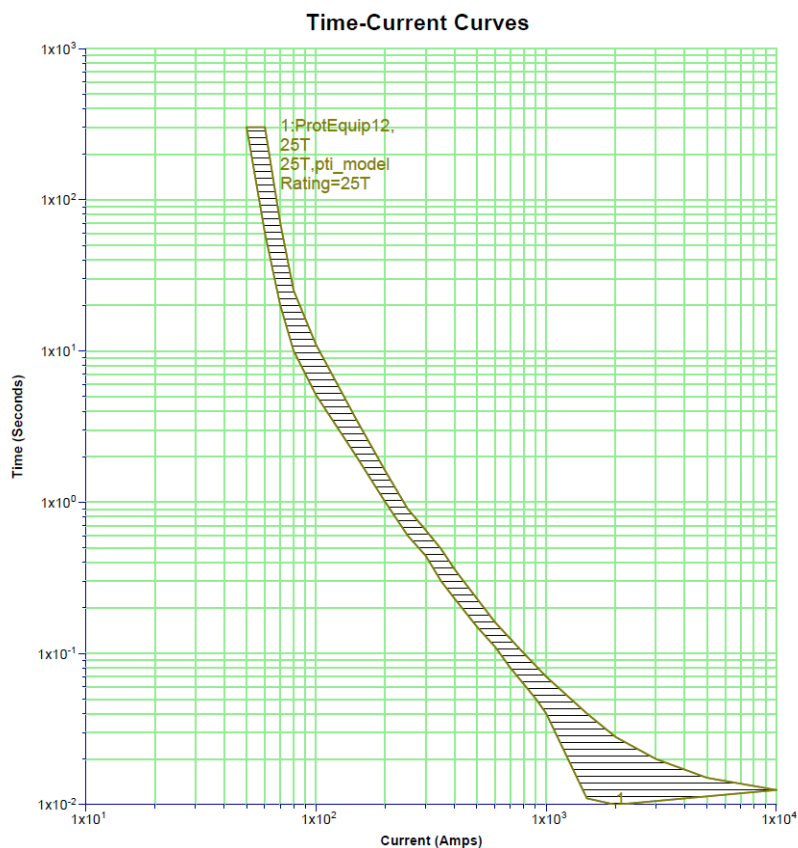
Στο ακόλουθο διάγραμμα, φαίνεται πως επηρεάζει η αλλαγή της σταθεράς χρόνου την καμπύλη.



Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστική καμπύλη I-t με παράμετρο τη σταθερά χρόνου

Στη συνέχεια με κατάλληλη επιλογή των μεταβλητών της καμπύλης διαμορφώνεται η τελική μορφή της.

Εισάγονται επίσης οι καμπύλες των τηκτών, οι οποίες είναι μορφής 'περιοχής' και όχι 'ευθείας' λόγω της μικρής ακρίβειας στο χρόνο ενεργοποίησής τους.

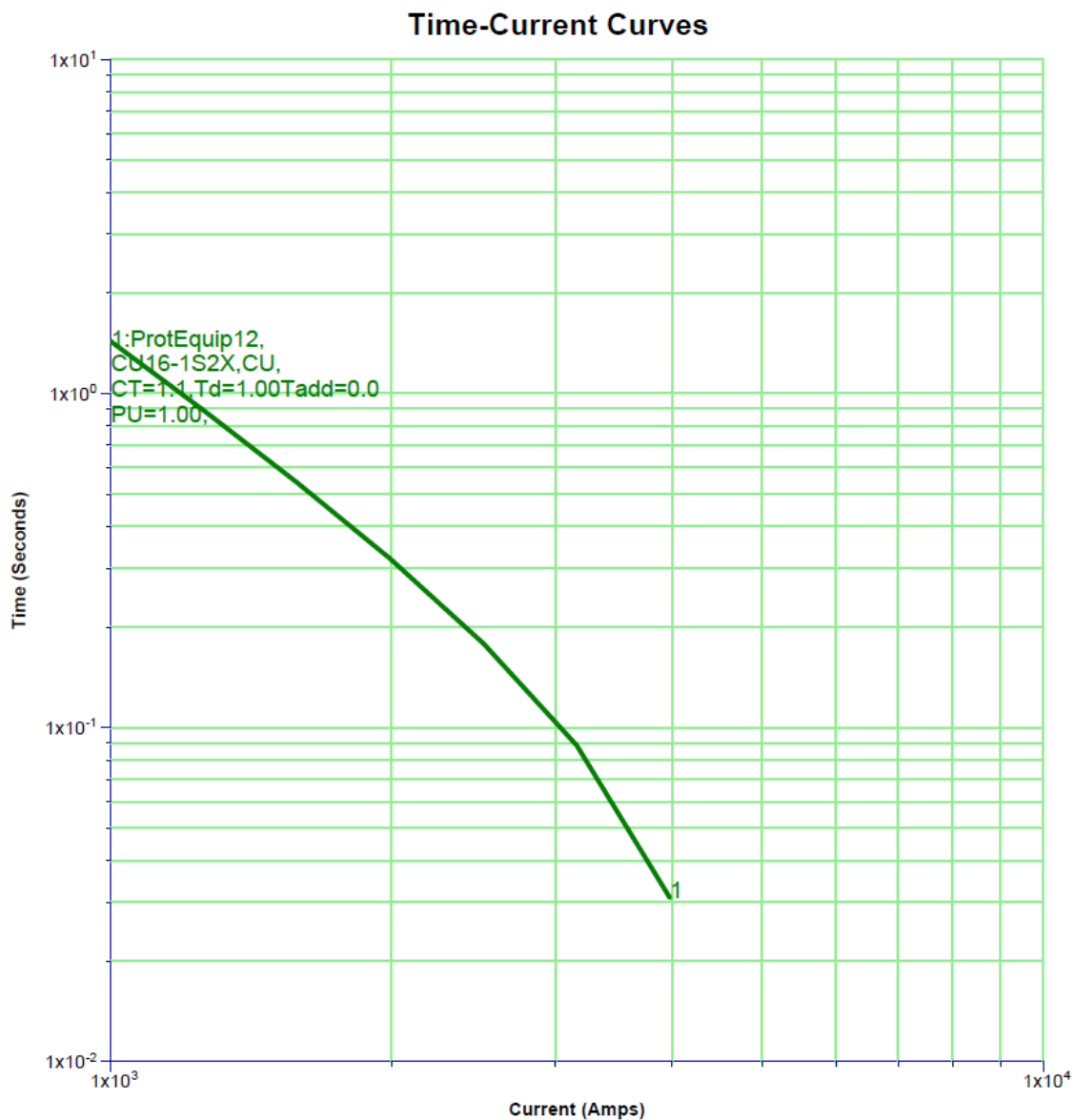


Σχήμα 5.6: Παράδειγμα καμπύλης αντιστρόφου χρόνου, τηκτού 25T

Σχετικά με τα τηκτά, αναφέρεται ότι τα 30T είναι πιο αργά από τα 20T κ.ο.κ. Στο διάγραμμα που εξετάζεται η αλληλουχία ενεργοποίησης των προστασιών, χρησιμοποιούνται αρχικά τα πιο αργά τηκτά (30T – που είναι η μέγιστη τιμή που χρησιμοποιείται στα δίκτυα Μ.Τ.), ώστε αν εξασφαλιστεί η συνεργασία του ηλεκτρονόμου της αναχώρησης με αυτήν την κατηγορία τηκτών, εξασφαλίζεται και η συνεργασία του με οποιοδήποτε άλλο τηκτό, που βρίσκεται ήδη ή μπορεί να εγκατασταθεί μελλοντικά στο δίκτυο. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση ο Διακόπτης Ισχύος της αναχώρησης πρέπει να ανοίγει σε χρόνους μικρότερους από 4 s. Κατά συνέπεια, τηκτά που ενεργοποιούνται σε χρόνους μεγαλύτερους των 4 s δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης για τα τηκτά, δεν επιλέγονται χρόνοι λειτουργίας μικρότεροι του 0.1s, γιατί θεωρείται ότι αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το σφάλμα εκτίμησης του χρόνου λειτουργίας του τηκτού και συνεπώς δεν υπάρχει αξιοπιστία.

Τέλος, εισάγεται η θερμική αντοχή των αγωγών, δηλαδή οι καμπύλες που απεικονίζουν σε ποιο χρόνο (συνολικά) λιώνουν οι αγωγοί για δεδομένο ρεύμα (οι καμπύλες αυτές αναφέρονται σε χρόνους αντοχής κατά τη διάρκεια λειτουργίας χρονικής καθυστέρησης των ηλεκτρονόμων και όχι στη στιγμιαία λειτουργία, ούτε όμως σε συνεχή φόρτιση των αγωγών).

Παράδειγμα: Καμπύλη αγωγού CU161S2X απεικονίζει τη θερμική αντοχή χάλκινου αγωγού CU, διατομής 16mm², για σύνδεση σε H/N με 1 γρήγορη και 2 αργές επαναφορές.



Σχήμα 5.6: Παράδειγμα καμπύλης αγωγού CU161S2X

5.4 Πρακτικοί κανόνες για τη συνεργασία των μέσων προστασίας που εφαρμόζονται κατά τη διενέργεια μελέτης προστασίας

Προκειμένου τα μέσα προστασίας να συνεργάζονται αποτελεσματικά, ακολουθούνται ορισμένοι βασικοί κανόνες, που αφορούν τους διαφορετικούς χρόνους ενεργοποίησης των προστασιών.

Βασικός κανόνας είναι ότι στο διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι καμπύλες όλων των μέσων προστασίας που υπάρχουν στη γραμμή, το οποίο καλείται διάγραμμα αλληλουχίας, θα πρέπει οι καμπύλες λειτουργιών χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου της αναχώρησης να είναι «επάνω» από τις υπόλοιπες και γενικά το μέσο που επιθυμούμε να επενεργήσει πρώτο στο σφάλμα, να έχει καμπύλη που θα βρίσκεται πιο κάτω από τις υπόλοιπες καμπύλες. Οι καμπύλες των αγωγών θα πρέπει να βρίσκονται πιο ψηλά, για τις τιμές των βραχυκυκλωμάτων που τους αφορούν. Οι απεικονίσεις είναι όλες σε λογαριθμική κλίμακα.

5.4.1 Για τους αγωγούς

Θα πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξής δύο συνθήκες:

- Ο χρόνος καταστροφής των αγωγών να είναι μικρότερος των 200 ms.
- Η διαφορά χρόνου μεταξύ χρονικής καθυστέρησης φάσης του διακόπτη ισχύος και του αγωγού να είναι μεγαλύτερη των 50 ms.

Οι συνθήκες αυτές ελέγχονται στο αρχείο με το μέγιστο τριφασικό βραχυκύκλωμα προς γη, που είναι και το μεγαλύτερο βραχυκύκλωμα.

5.4.2 Για τη λειτουργία χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου φάσεων του ΔΙ:

Το ρεύμα ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου (pickup current) είναι η ελάχιστη τιμή μεταξύ των ακόλουθων:

- Του μέγιστου ρεύματος αντοχής των Μ/Σ εντάσεως του διακόπτη
- Του μέγιστου ρεύματος συνεχούς φόρτισης του αγωγού του κορμού της γραμμής
- Της τιμής του ρεύματος του ελάχιστου διφασικού βραχυκυκλώματος, που παρουσιάζεται στην υπό μελέτη γραμμή

Ο Συντελεστής Χρόνου της καμπύλης χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου σφάλματος φάσης επιλέγεται με τέτοιον τρόπο ώστε στο μέγιστο βραχυκύκλωμα φάσεων (που είναι το 3φασικό στην κοντινότερη προς την πηγή θέση, αφού το δίκτυο είναι ακτινικό) να ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος σε χρόνο λίγο μεγαλύτερο από 0.1s. Επίσης ελέγχεται ώστε στο ελάχιστο βραχυκύκλωμα φάσεων (2-φασικό) ο Η/Ν να ενεργοποιείται σε χρόνο μικρότερο από 4 s. Τέλος, επιδιώκεται η καμπύλη να είναι πάνω από την περιοχή της καμπύλης των τηκτών, τουλάχιστον για τα ρεύματα που είναι μεγαλύτερα από το ελάχιστο διφασικό βραχυκύκλωμα.

5.4.3 Για τη στιγμιαία λειτουργία του ηλεκτρονόμου φάσεων του ΔΙ

Το ρεύμα ενεργοποίησης της στιγμιαίας λειτουργίας (pickup current) είναι η ελάχιστη τιμή μεταξύ των ακόλουθων:

- του διπλάσιου (ή του 150%) του ρεύματος pickup της λειτουργίας χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου σφάλματος φάσεων
- του ελάχιστου φασικού βραχυκυκλώματος

Ο χρόνος λειτουργίας για τη στιγμιαία λειτουργία είναι 0.1s για κάθε τιμή ρεύματος (σταθερός, οριζόντια γραμμή).

5.4.4 Για τη λειτουργία χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου γης του ΔΙ

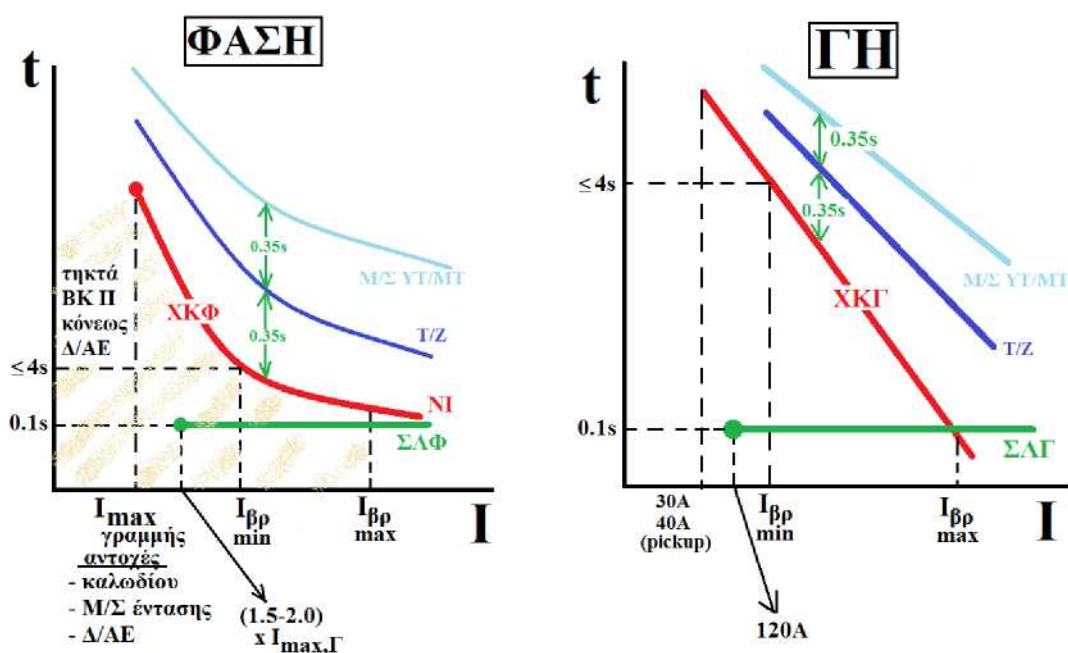
Το ρεύμα ενεργοποίησης της χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου γης (pickup current) είναι 30 ή 40 A, το οποίο είναι αρκετά μικρότερο από το ελάχιστο σφάλμα γης.

Ο Συντελεστής Χρόνου της καμπύλης χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου γης πρέπει να έχει τέτοια τιμή ώστε στο ελάχιστο βραχυκύκλωμα γης (που είναι το μονοφασικό ως προς γη μέσω αντίστασης γης π.χ. $R=40\Omega$), στο πιο απομακρυσμένο σημείο από την πηγή του ακτινικού δικτύου, ο Η/Ν να ενεργοποιείται σε χρόνο μικρότερο από 4 s. Η επιλογή γίνεται ώστε η καμπύλη λειτουργίας χρονικής καθυστέρησης του Η/Ν γης να είναι (ελάχιστα) πάνω από την περιοχή της καμπύλης των τηκτών που υπάρχουν στο δίκτυο γενικά ή έστω στη «διαδρομή» του ρεύματος του βραχυκυκλώματος. Για παράδειγμα, τα 30T δίνουν πολύ μεγάλους χρόνους τήξεως, οπότε δεν λαμβάνονται υπόψη και εξετάζεται η καμπύλη του ηλεκτρονόμου να είναι πιο ψηλά από την καμπύλη των 25T, τουλάχιστον για ρεύματα μεγαλύτερα από το ελάχιστο βραχυκύκλωμα ως προς γη.

5.4.5 Για τη στιγμιαία λειτουργία του ηλεκτρονόμου γης του ΔΙ

Το ρεύμα ενεργοποίησης της στιγμιαίας λειτουργίας (pickup current) είναι τα 120 A.

Ο χρόνος λειτουργίας για τη στιγμιαία λειτουργία είναι 0.1s για κάθε τιμή ρεύματος (σταθερός, οριζόντια γραμμή).



Σχήμα 5.7: Ενδεικτικά διαγράμματα αλληλουχίας προστασίας

5.4.6 Για την εγκατάσταση των τηκτών

Στους υπαίθριους Υ/Σ Διανομής τοποθετούνται κατά κανόνα ασφάλειες εκτόνωσης. Σε πολυσύχναστες θέσεις ή σε θέσεις με μεγάλη ισχύ βραχυκύκλωσης στη ΜΤ, καλό είναι να βάζουμε ασφάλειες κόνεως. Στους Υ/Σ εσωτερικού χώρου βάζουμε πάντοτε ασφάλειες κόνεως.

Οι ασφάλειες προστασίας των Μ/Σ τοποθετούνται στο στύλο ή το δίστυλο που στηρίζεται ο Μ/Σ, ή σε έναν προηγούμενο στύλο της γραμμής που τροφοδοτεί τον Υ/Σ, οπότε η ασφάλεια προστατεύει και τη γραμμή αυτή. Στην περίπτωση αυτή οι ασφάλειες καθορίζονται από τα κριτήρια προστασίας του Μ/Σ και το μήκος της απόστασης που τοποθετούνται, καλό είναι η απόσταση αυτή να μην υπερβαίνει τα 1000

μέτρα από το Μ/Σ. Γενική αρχή είναι ότι η θέση τοποθέτησης των ασφαλειών πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμη.

Τα τηκτά ταχείας τήξης των ασφαλειών εκτόνωσης χαρακτηρίζονται με τον αριθμό που παριστάνει την ονομαστική ένταση σε Α και το γράμμα Κ (π.χ. 12Κ) . Το γράμμα Τ χαρακτηρίζει τα τηκτά βραδείας τήξης που χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακλαδώσεων του δικτύου ΜΤ (π.χ. 30Τ) .

Οι ασφάλειες πρέπει να έχουν τέτοια ονομαστική ένταση, ώστε να προστατεύουν το Μ/Σ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στην πλευρά της ΧΤ και σε θέση πριν από τις ασφάλειες ΧΤ .

Οι ασφάλειες δεν πρέπει να περιορίζουν τη δυνατότητα υπερφόρτισης του Μ/Σ . Η έντασή τους πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ονομαστική ένταση του Μ/Σ στη ΜΤ .

Οι ασφάλειες δεν πρέπει να καίγονται από το ρεύμα ξεύξης του Μ/Σ .

Βασική απαίτηση για τη λειτουργία του συστήματος ΜΤ είναι, οι ασφάλειες ΜΤ προστασίας Μ/Σ πρέπει να συνεργάζονται με τα άλλα μέσα προστασίας του δικτύου ΜΤ, δηλαδή ότι σε περίπτωση βραχυκυκλώματος μετά από τις ασφάλειες πρέπει να λειτουργούν αυτές και να μην μείνει μόνιμα ανοικτό κανένα άλλο μέσο προστασίας ΜΤ . Κατάλληλοι πίνακες δίνουν τα απαιτούμενα μεγέθη των ασφαλειών τα οποία έχουν επιλεγεί, ώστε να συνεργάζονται :

- Με τους ΔΙ των αναχωρήσεων των γραμμών ΜΤ, εφόσον έχουν τις τυποποιημένες ρυθμίσεις .
- Με τους διακόπτες αυτόματης επαναφοράς που μπαίνουν στις γραμμές ΜΤ.
- Με τις ασφάλειες διακλαδώσεων με τηκτό 30Τ (εκτός της περίπτωσης με ασφάλειες εκτόνωσης 40Κ που προβλέπονται για Μ/Σ 500 ΚVΑ, οι οποίοι σπάνια χρησιμοποιούνται σε Υ/Σ εξωτερικού χώρου).

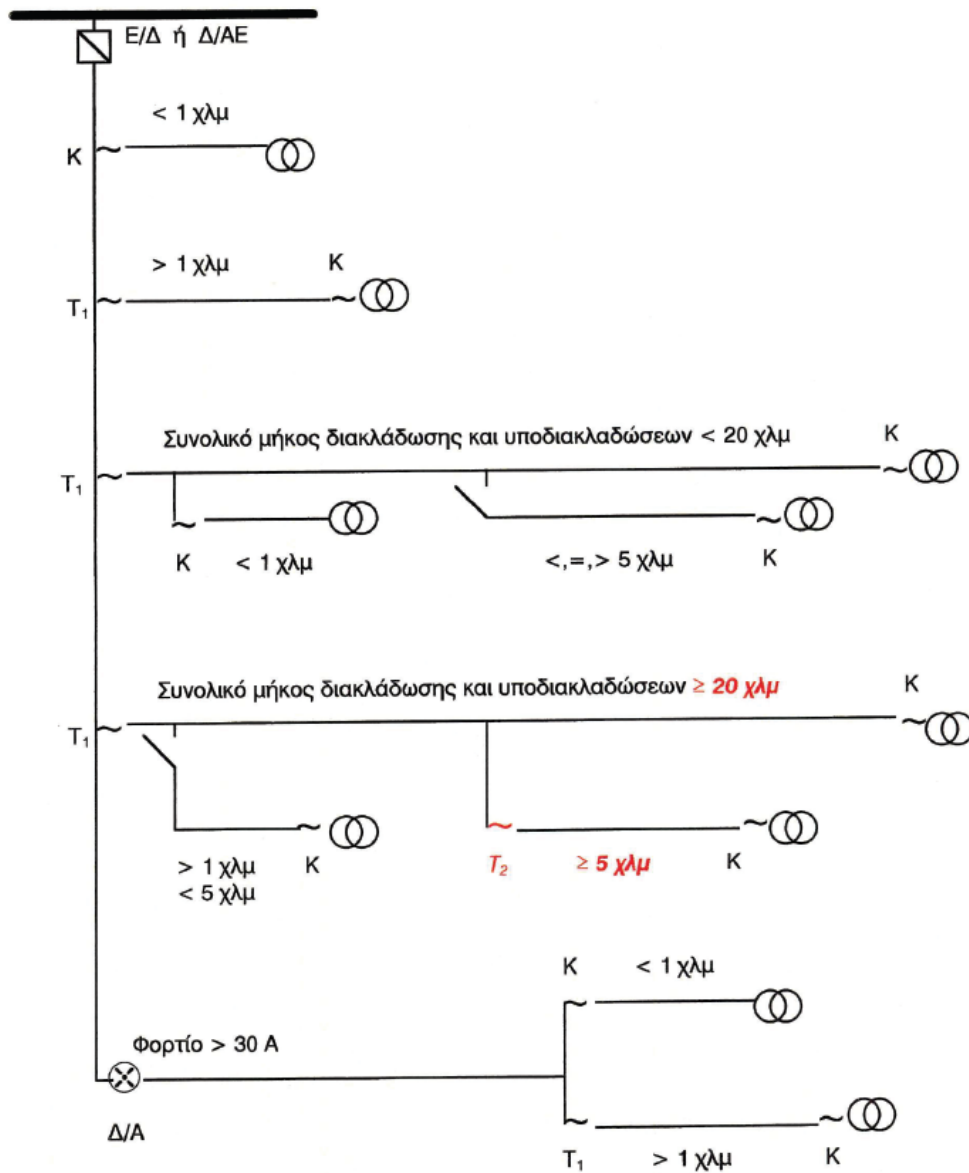
Διακλαδώσεις που δεν προστατεύονται με τηκτό θεωρούνται τμήματα του κορμού. Σε τέτοια διακλάδωση που έχει στην αρχή της ΔΑ ή που είναι γεφυρωμένη, όλες οι υποδιακλαδώσεις πρέπει να προστατεύονται με ασφαλειοαποζεύκτη τύπου (Τ), εκτός από υποδιακλαδώσεις με μήκος μικρότερο των 1.000 μέτρων και με ένα μόνο Μ/Σ, οπότε ο ασφαλειοαποζεύκτης (Α/Ζ) (τύπου Κ) του Μ/Σ μπαίνει στην αρχή της υποδιακλάδωσης. Οι ασφαλειοαποζεύκτες του Μ/Σ (που είναι πάντα τύπου Κ), δεν μπορεί να είναι πάνω από 1.000 μέτρα μακριά από τον Μ/Σ.

Πριν από Α/Ζ (Κ) μπορούν να τοποθετηθούν το πολύ μέχρι 2 σειρές Α/Ζ (Τ). Μάλιστα για να επιτραπεί η τοποθέτηση δεύτερης σειράς Α/Ζ πρέπει να ισχύουν όλες οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Η διακλάδωση που έχει την 1^η σειρά A/Z (T) μαζί με τις υποδιακλαδώσεις να έχει συνολικό μήκος μεγαλύτερο ή ίσο με 20 χιλιόμετρα.
2. Η υποδιακλάδωση στην οποία θα μπει η 2^η σειρά A/Z (T) να έχει μήκος μεγαλύτερο ή ίσο με 5 χιλιόμετρα.
3. Οι δύο σειρές A/Z (T), να συνεργάζονται.

Για κάθε άλλη περίπτωση απαιτείται ιδιαίτερη εξέταση. Η συνεργασία A/Z (T) και A/Z (K) πρέπει να ελέγχεται. Πάντως αν δεν υπάρχει συνεργασία δεν θα πρέπει να τοποθετηθούν μικρότερες ασφάλειες προστασίας M/Σ, αλλά να τροποποιηθούν οι ρυθμίσεις των άλλων μέσων προστασίας ή να αφαιρεθούν ασφάλειες προστασίας διακλαδώσεων ή υποδιακλαδώσεων του δικτύου MT, έτσι ώστε να μπορεί να υπάρξει συνεργασία .

Μερικές από τις παραπάνω επισημάνσεις για την εγκατάσταση των ασφαλειών, φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.8: Συνοπτικό διάγραμμα για την εγκατάσταση των ασφαλειών

5.4.7 Για τη ρύθμιση αυτόματων επαναφορών ΔΙ και κύκλων στους ΔΑ

Γενικά ανάλογα με το είδος του δικτύου που προστατεύει ο Διακόπτης Ισχύος, εφαρμόζονται τα ακόλουθα αναφορικά με τους κύκλους λειτουργίας των ηλεκτρονόμων σφαλμάτων υπερεντάσεων που διαθέτει.

Είδος δικτύου	Αυτόματες Επαναφορές	Λειτουργίες
Αμιγώς Υπόγειο Δίκτυο	0	XK
Υπόγειο Δίκτυο με εναέριους Υ/Σ Διανομής	1 αργή	ΣΛ + XK
Υπόγειο και Εναέριο Δίκτυο	1 γρήγορη + 1 αργή	ΣΛ + 2XK
Εναέριο Δίκτυο	1 γρήγορη + 2 αργές	ΣΛ + 3XK

Πίνακας 5.1: Πίνακας κύκλων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων σφαλμάτων υπερεντάσεων ανάλογα με το είδος του δικτύου

Επειδή ο αριθμός κύκλων k ενός ΔΑ σημαίνει ότι ο ΔΑ ανοίγει στις k μεταβάσεις από υψηλό (μεγαλύτερο από το ρεύμα ενεργοποίησής του) σε μηδενικό ρεύμα, συνεπάγεται ότι ανάλογα με τη ρύθμιση των κύκλων του Διακόπτη Ισχύος της αναχώρησης μίας γραμμής διανομής, καθορίζεται και η τιμή της παραμέτρου των κύκλων λειτουργίας των ΔΑ στη γραμμή αυτή, που θα είναι:

$$k(\Delta A) = k(\Delta I) - 1.$$

Σε πρακτικό επίπεδο για να πραγματοποιηθεί μία Μελέτη Προστασίας, πρέπει να λαμβάνεται η προηγούμενη Μελέτη Προστασίας καθώς και οποιοδήποτε μεταγενέστερο στοιχείο αυτής που τη συμπληρώνει (π.χ. ύπαρξη νέου Η/Ν, καινούριων Μ/Σ εντάσεως, στοιχεία που καθιστούν γνωστή την αλλαγή του δικτύου που εξετάζουμε, όπως η πληροφορία για αντικατάσταση αγωγών).

5.5 Παραδείγματα μελέτης προστασίας σε γραμμές MT.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα σφάλματα και διαγράμματα αλληλουχίας για δύο διαφορετικές γραμμές διανομής: η διατομή του εναερίου δικτύου της πρώτης γραμμής είναι 35mm² CU, ενώ της δεύτερης είναι 95mm² CU. Τα διαγράμματα αλληλουχίας αφορούν αφενός μεν σε σφάλματα φάσεων (απεικονίζεται η καμπύλη της λειτουργίας χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου φάσεων) και αφετέρου σε σφάλματα ως προς γη (απεικονίζεται η καμπύλη της λειτουργίας χρονικής καθυστέρησης του ηλεκτρονόμου γης). Οι υπολογισμοί και η απεικόνιση των διαγραμμάτων αλληλουχίας, έγιναν με χρήση του λογισμικού PSS - ADEPT (version 5.3).

Το πρόγραμμα PSS – ADEPT σήμερα υποστηρίζεται από την εταιρία SIEMENS μέσω του προγράμματος PSS – SINCAL.

Παράδειγμα γραμμής μέσης τάσης με εναέριο δίκτυο 35mm² CU

Αρχικά απεικονίζεται η τοπολογία της γραμμής διανομής, με τα μήκη των αγωγών και τον τύπο του καθενός (Σχήμα 5.9).

Στη συνέχεια απεικονίζεται το σύνολο των τριφασικών ως προς γη βραχυκυκλωμάτων, προκειμένου να βρεθεί η θέση του μέγιστου. Αυτή είναι μία διαδικασία που προηγείται κάθε φορά που αναζητούμε είτε το ελάχιστο είτε το μέγιστο από μία κατηγορία σφαλμάτων (Σχήμα 5.10).

Ακολούθως παρουσιάζονται τέσσερα διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται τα εξής σφάλματα:

μέγιστο τριφασικό σφάλμα (Σχήμα 5.11)

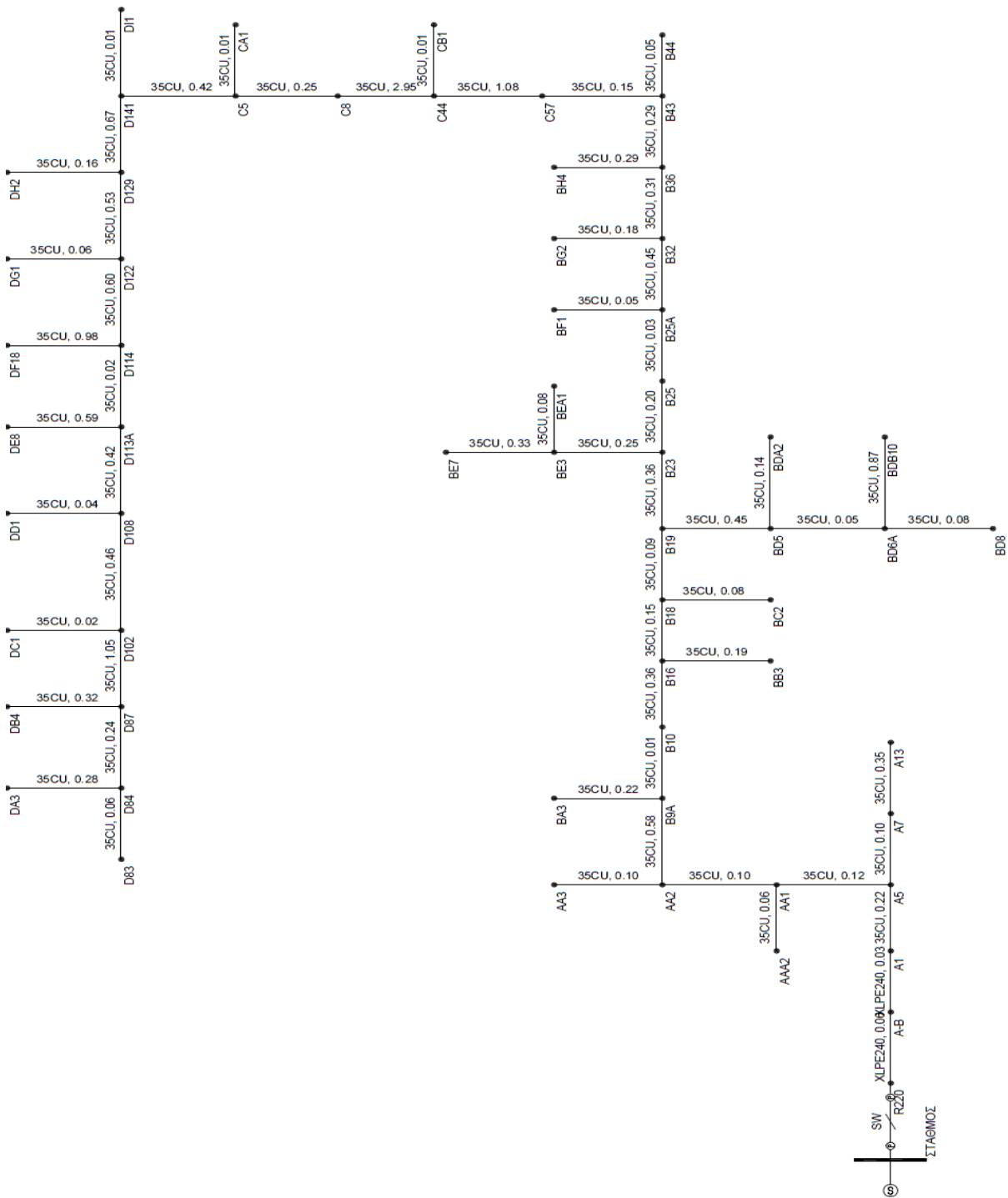
ελάχιστο διφασικό σφάλμα (Σχήμα 5.12)

μέγιστο μονοφασικό σφάλμα φάσης με γη (Σχήμα 5.13)

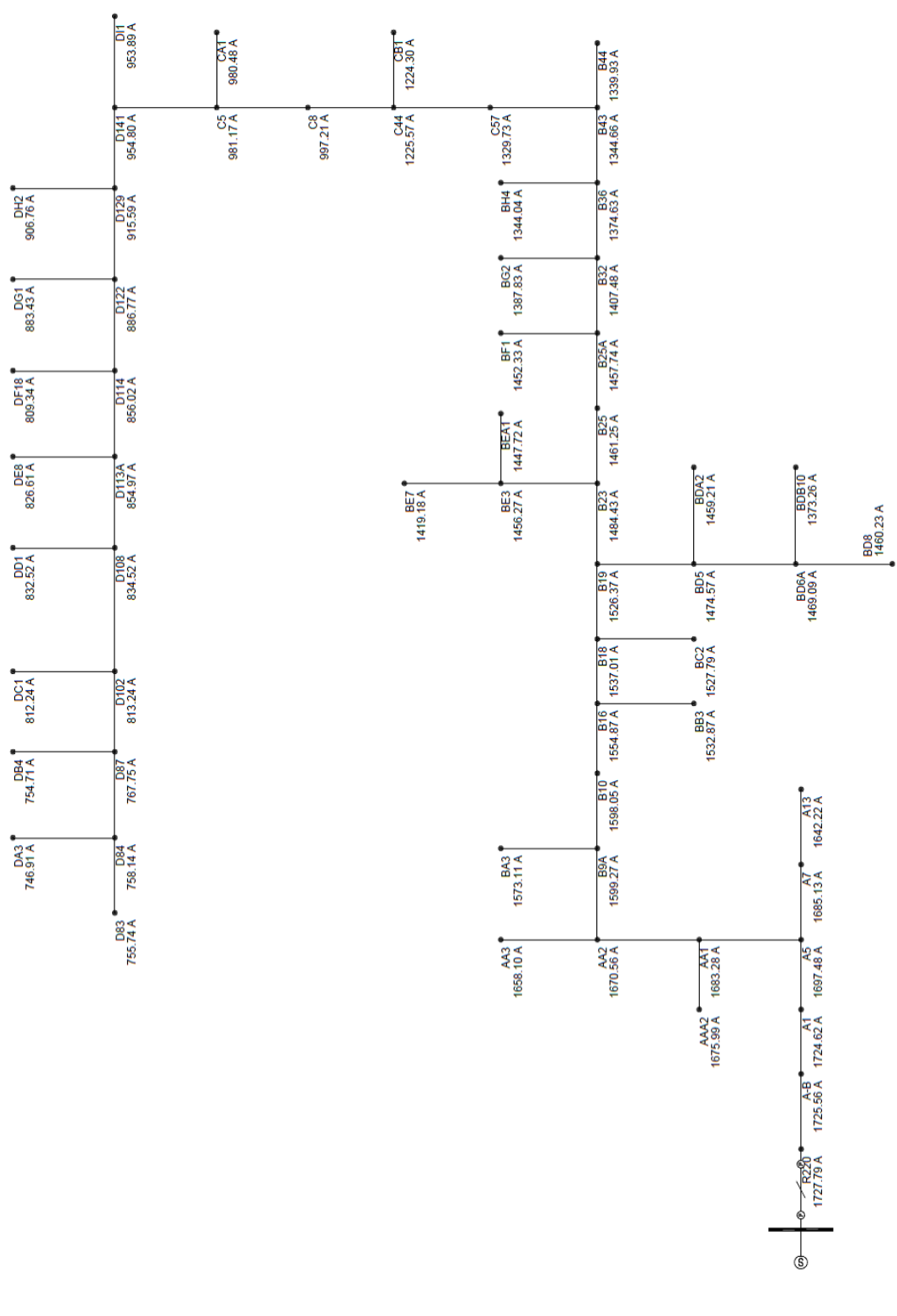
ελάχιστο σφάλμα φάσης με γη (Σχήμα 5.14)

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα αλληλουχίας σε σφάλματα φάσεων των μέσων προστασίας της γραμμής (Σχήμα 5.15). Τέλος δίνεται το διάγραμμα αλληλουχίας σε σφάλματα ως προς γη, των μέσων προστασίας της γραμμής (Σχήμα 5.16).

Η επιλογή των παραμέτρων για τη χάραξη της καμπύλης του ηλεκτρονόμου γίνεται με βάση όσα αναφέρθηκαν, με τη βοήθεια κατάλληλης καρτέλας του λογισμικού.



Σχήμα 5.9: Τοπολογία δικτύου μέσης τάσης με τύπους και μήκη αγωγών

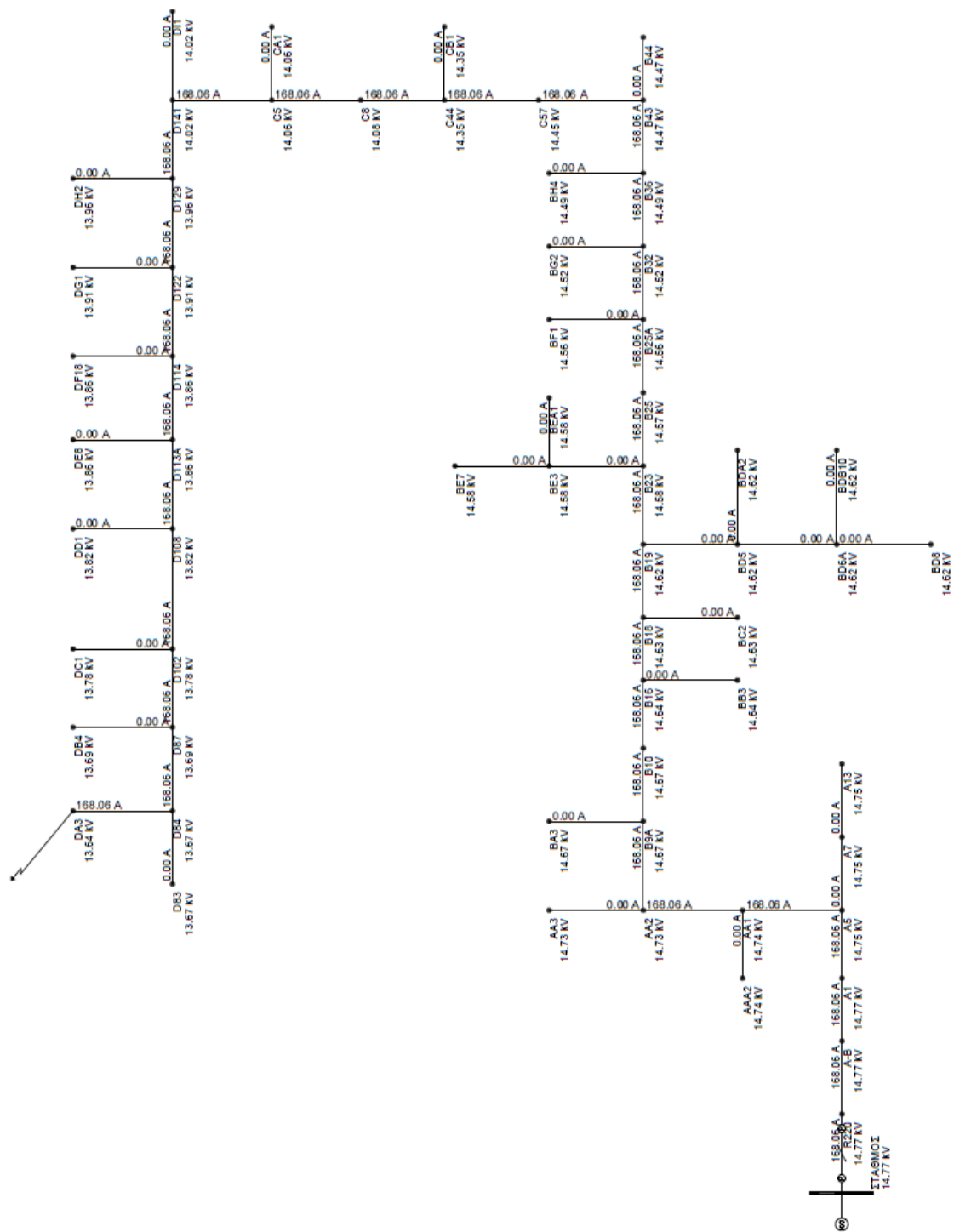


ΣΤΑΘΜΟΣ
1727.79 A

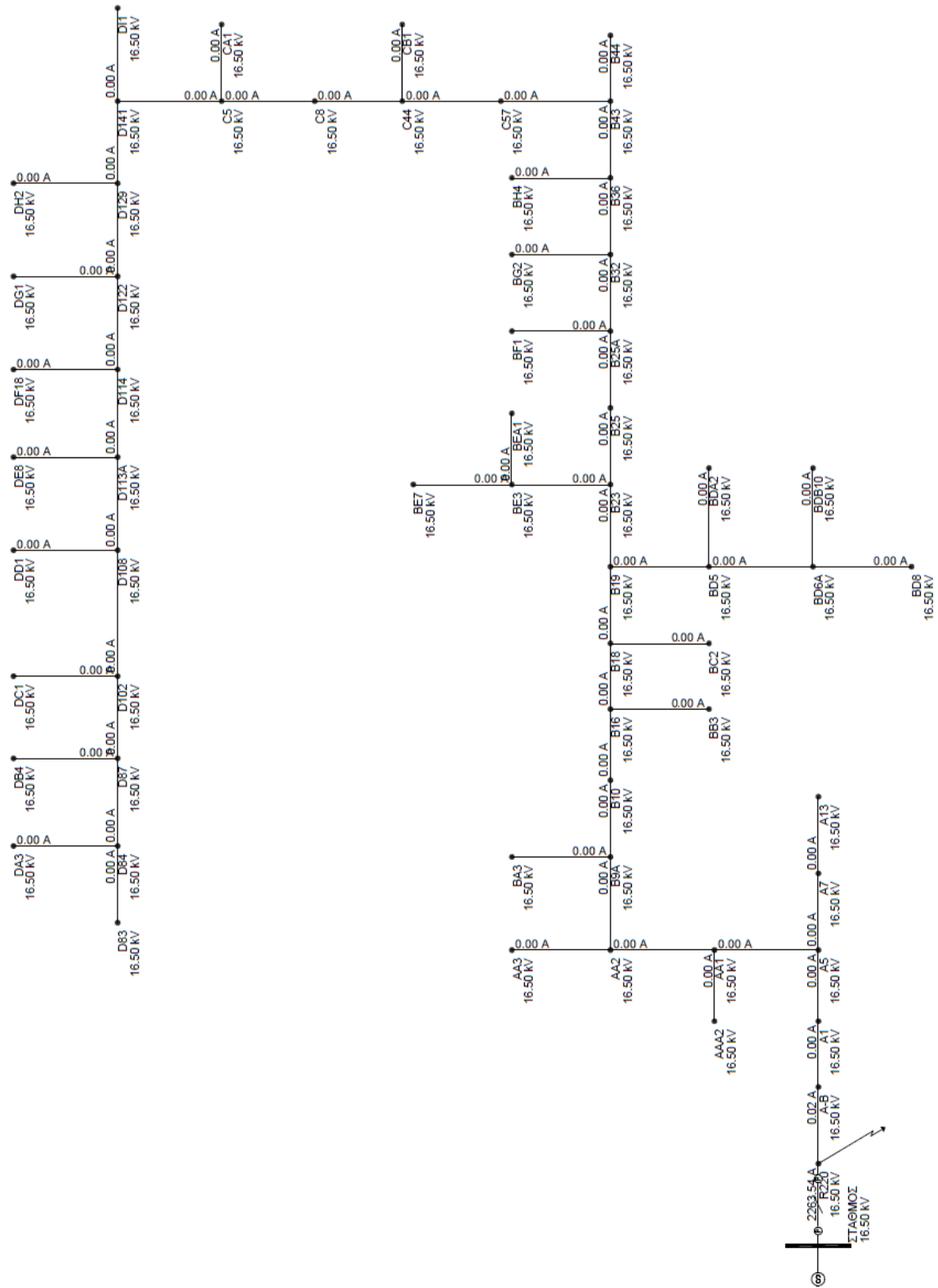
Σχήμα 5.10: Τιμές τριφασικών βραχυκυκλωμάτων ως προς γη σε κάθε θέση της γραμμής



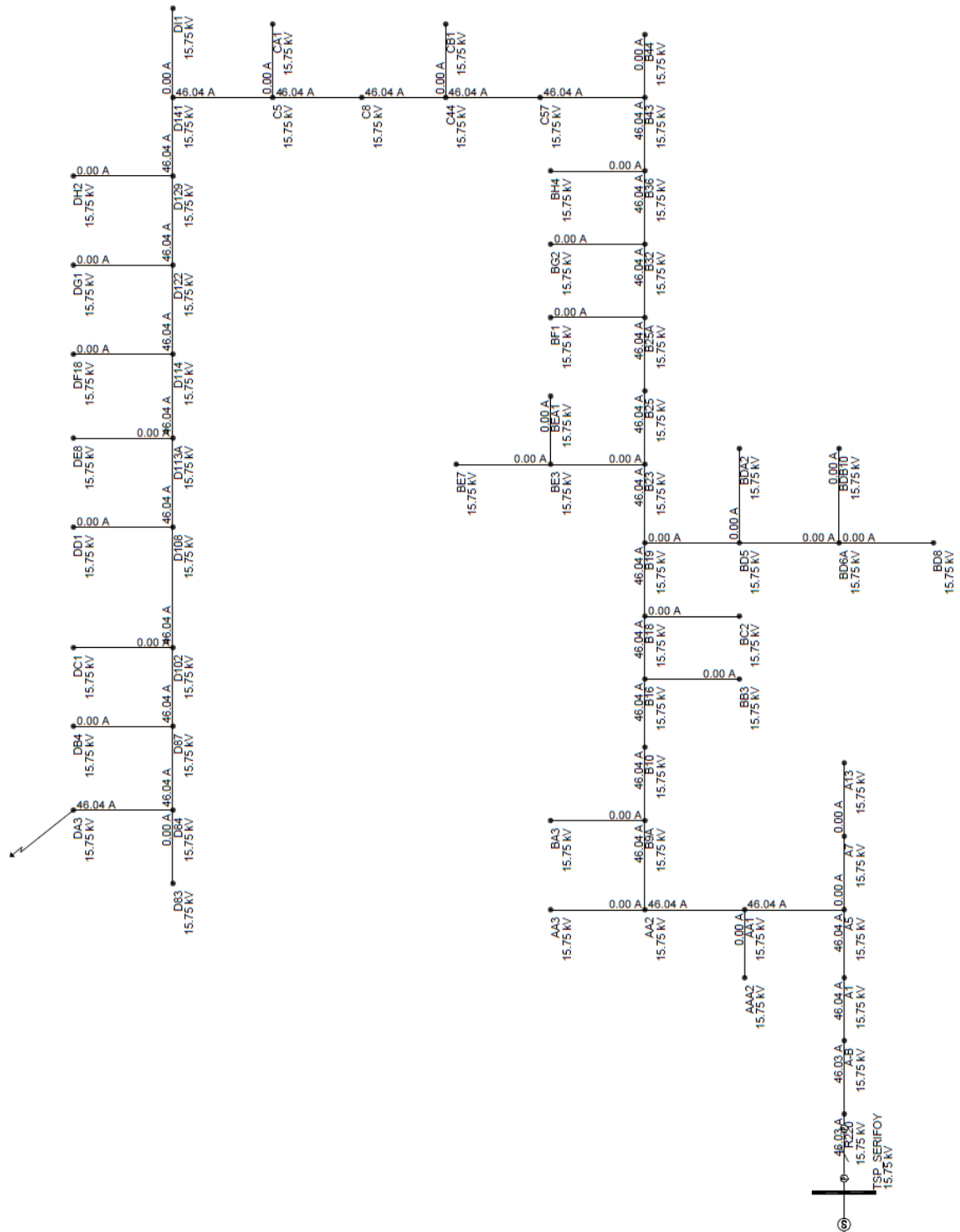
Σχήμα 5.11: Μέγιστο τριφασικό σφάλμα



Σχήμα 5.12: Ελάχιστο διαφασικό σφάλμα

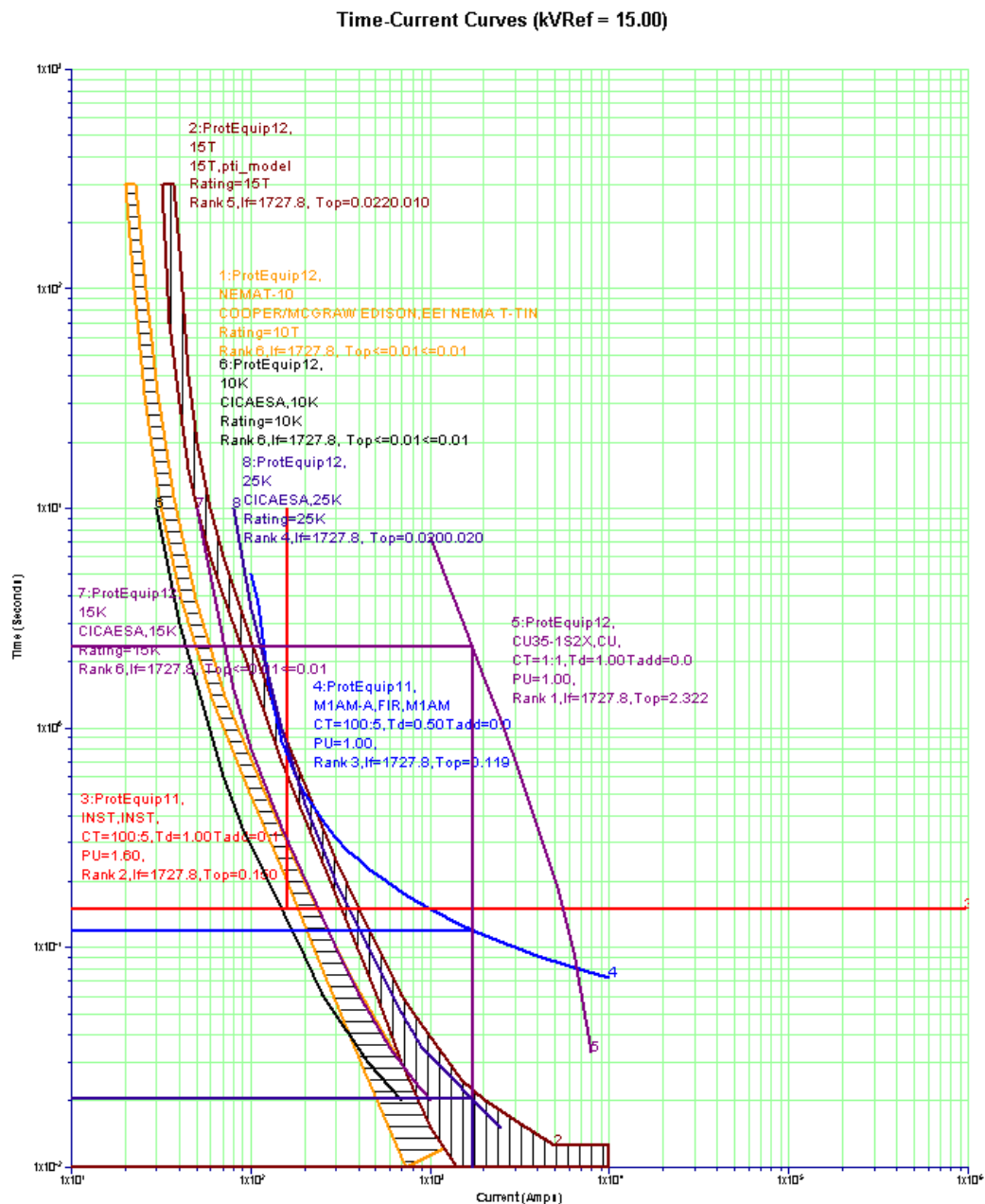


Σχήμα 5.13: Μέγιστο μονοφασικό σφάλμα με γη



Σχήμα 5.14: Ελάχιστο σφάλμα φάσης με γη

Διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο το μέγιστο τριφασικό σφάλμα



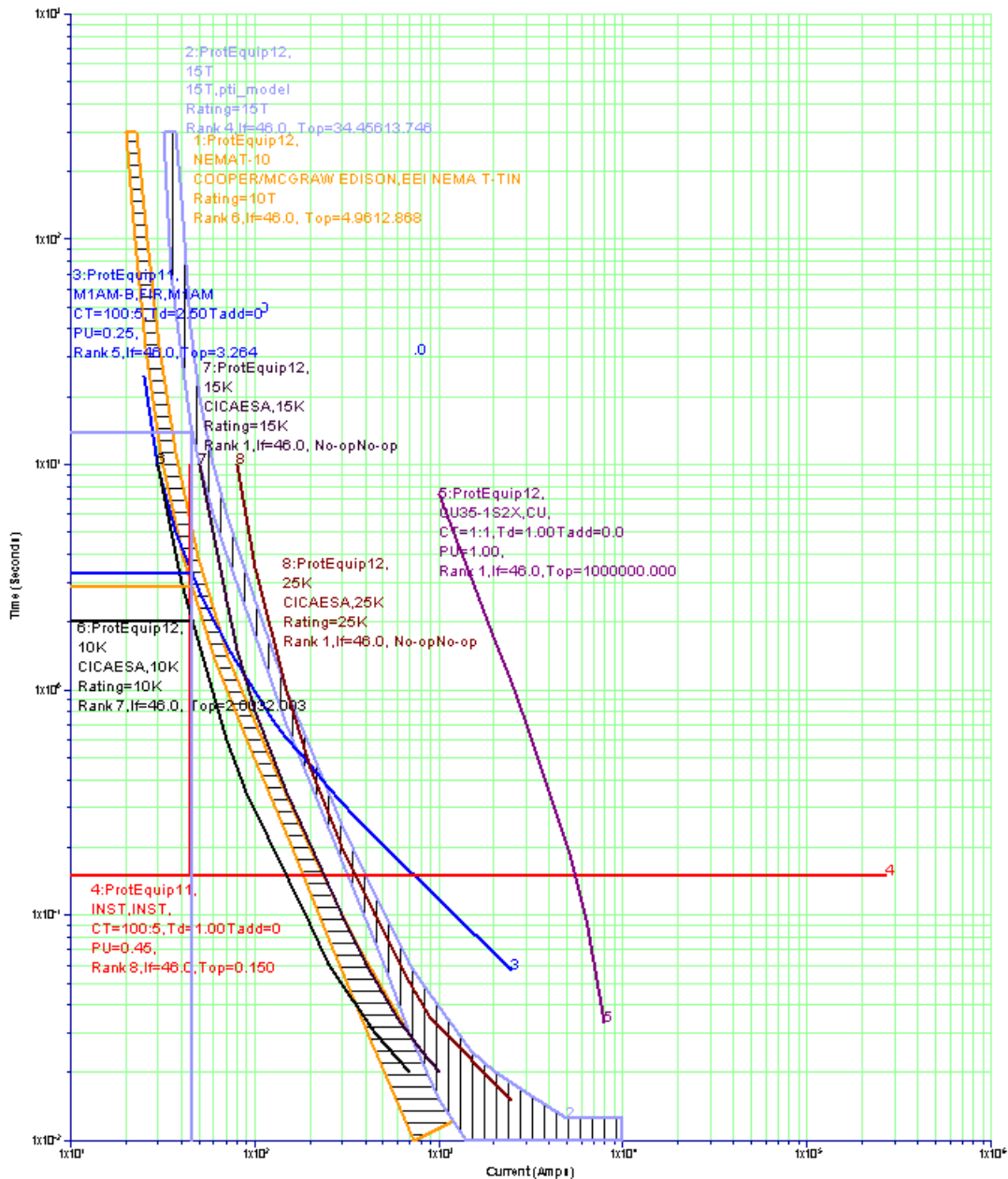
Plot	DeviceID	Branch	End	Current	Max Time	Min Time	Difference
5	CU35-1S2X	Switch1	R220	1727.794	2.322		
3	INST	Switch1	TSP_SERIF...	1727.794	0.150		2.172
4	M1AM-A	Switch1	TSP_SERIF...	1727.794	0.119		0.031
8	25K	Switch1	R220	1727.794	0.020	0.020	0.099
2	15T	Switch1	R220	1727.794	0.022	0.010	0.002
1	NEMAT-10	Switch1	R220	1727.794	<= 0.01	<= 0.01	0.010
6	10K	Switch1	R220	1727.794	<= 0.01	<= 0.01	0.000
7	15K	Switch1	R220	1727.794	<= 0.01	<= 0.01	0.000

Σχήμα 5.15: Καμπύλες των μέσων προστασίας που υπάρχουν στη γραμμή (ασφαλειών και ΔΙ) και η καμπύλη καταστροφής του μικρότερου αγωγού. Στον πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε μέσου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται το μέγιστο τριφασικό σφάλμα. Είναι προφανές ότι τα τηκτά 15T συνεργάζονται με τον Η/Ν του ΔΙ και ότι ο αγωγός με την ελάχιστη διατομή στο δίκτυο (35 Cu), έχει

χρόνο αντοχής πολύ μεγαλύτερο από το χρόνο μέσα στον οποίο θα λειτουργήσει ο ΔΙ για το δεδομένο ρεύμα.

Διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη

Time-Current Curves (kVRef = 15.00)



Plot	DeviceID	Branch	End	Current	Max Time	Min Time	Difference
5	CU35-1...	Switch1	R220	46.032	No-op		
7	15K	Switch1	R220	46.032	No-op	No-op	
8	25K	Switch1	R220	46.032	No-op	No-op	
2	15T	Switch1	R220	46.032	34.456	13.746	
3	M1AM-B	Switch1	TSP_SERIFOY	46.032	3.264		10.483
1	NEMAT...	Switch1	R220	46.032	4.961	2.868	1.697
6	10K	Switch1	R220	46.032	2.003	2.003	0.865
4	INST	Switch1	TSP_SERIFOY	46.032	0.150		1.853

Σχήμα 5.16: Καμπύλες των μέσων προστασίας που υπάρχουν στη γραμμή (ασφαλειών και ΔΙ) και η καμπύλη καταστροφής του μικρότερου αγωγού. Στον πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε μέσου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη. Είναι προφανές ότι για το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη ο H/N του ΔΙ δε συνεργάζεται με τα τηκτά.

Παράδειγμα γραμμής μέσης τάσης με εναέριο δίκτυο 95mm² CU

Αρχικά απεικονίζεται η τοπολογία της γραμμής διανομής, με τα μήκη των αγωγών και τον τύπο του καθενός (Σχήμα 5.17).

Στη συνέχεια απεικονίζεται το σύνολο των τριφασικών ως προς γη βραχυκυκλωμάτων, προκειμένου να βρεθεί η θέση του μέγιστου. Αυτή είναι μία διαδικασία που προηγείται κάθε φορά που αναζητούμε είτε το ελάχιστο είτε το μέγιστο από μία κατηγορία σφαλμάτων (Σχήμα 5.18).

Ακολούθως παρουσιάζονται τέσσερα διαγράμματα στα οποία απεικονίζονται τα εξής σφάλματα:

μέγιστο τριφασικό σφάλμα (Σχήμα 5.19)

ελάχιστο διφασικό σφάλμα (Σχήμα 5.20)

μέγιστο σφάλμα φάσης με γη (Σχήμα 5.21)

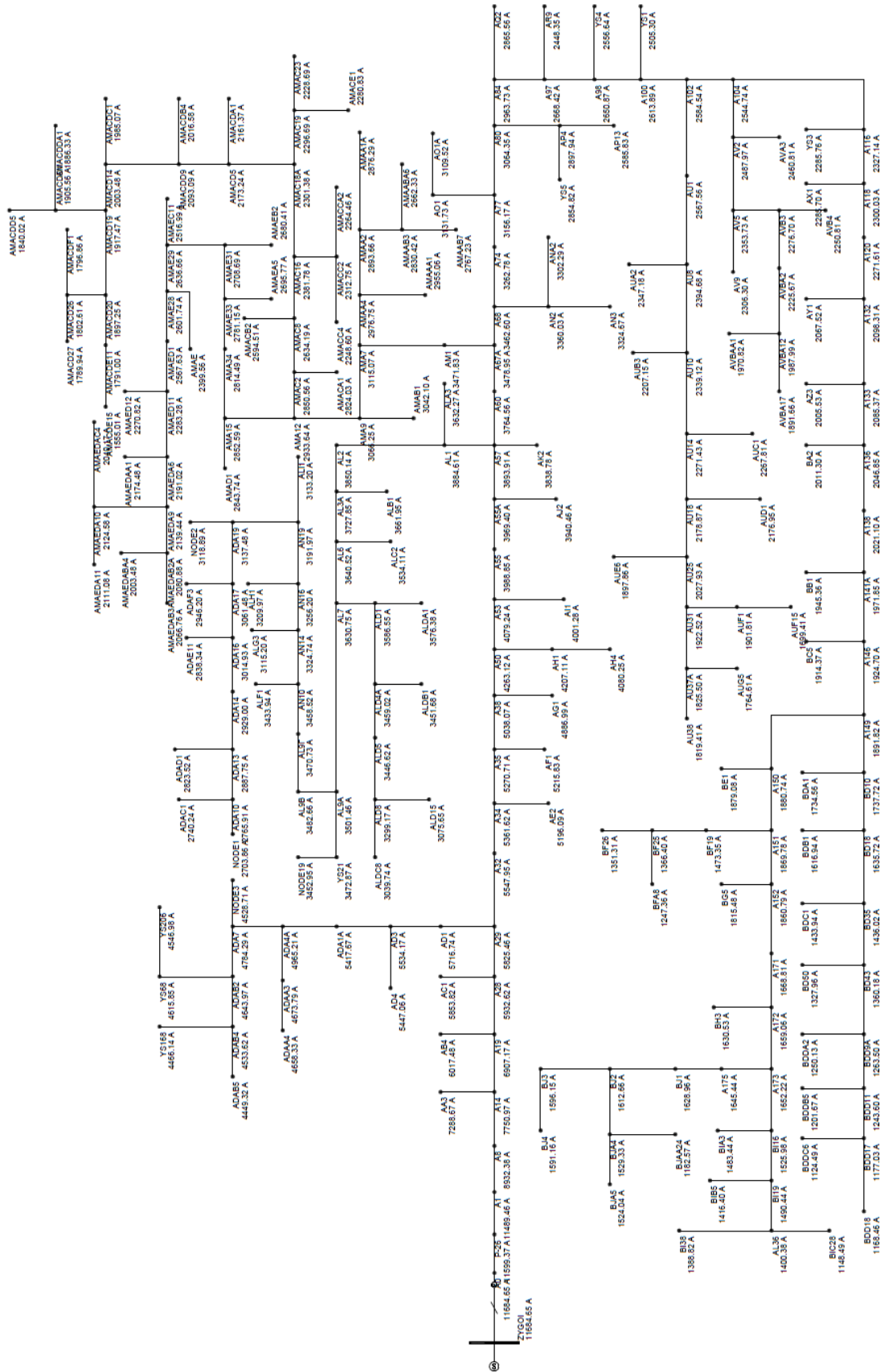
ελάχιστο σφάλμα φάσης με γη (Σχήμα 5.22)

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται το διάγραμμα με τριφασικό σφάλμα στην αρχή διακλάδωσης, σε ενδιάμεση θέση μεταξύ της αναχώρησης και του τέλους του κορμού της γραμμής (Σχήμα 5.23)

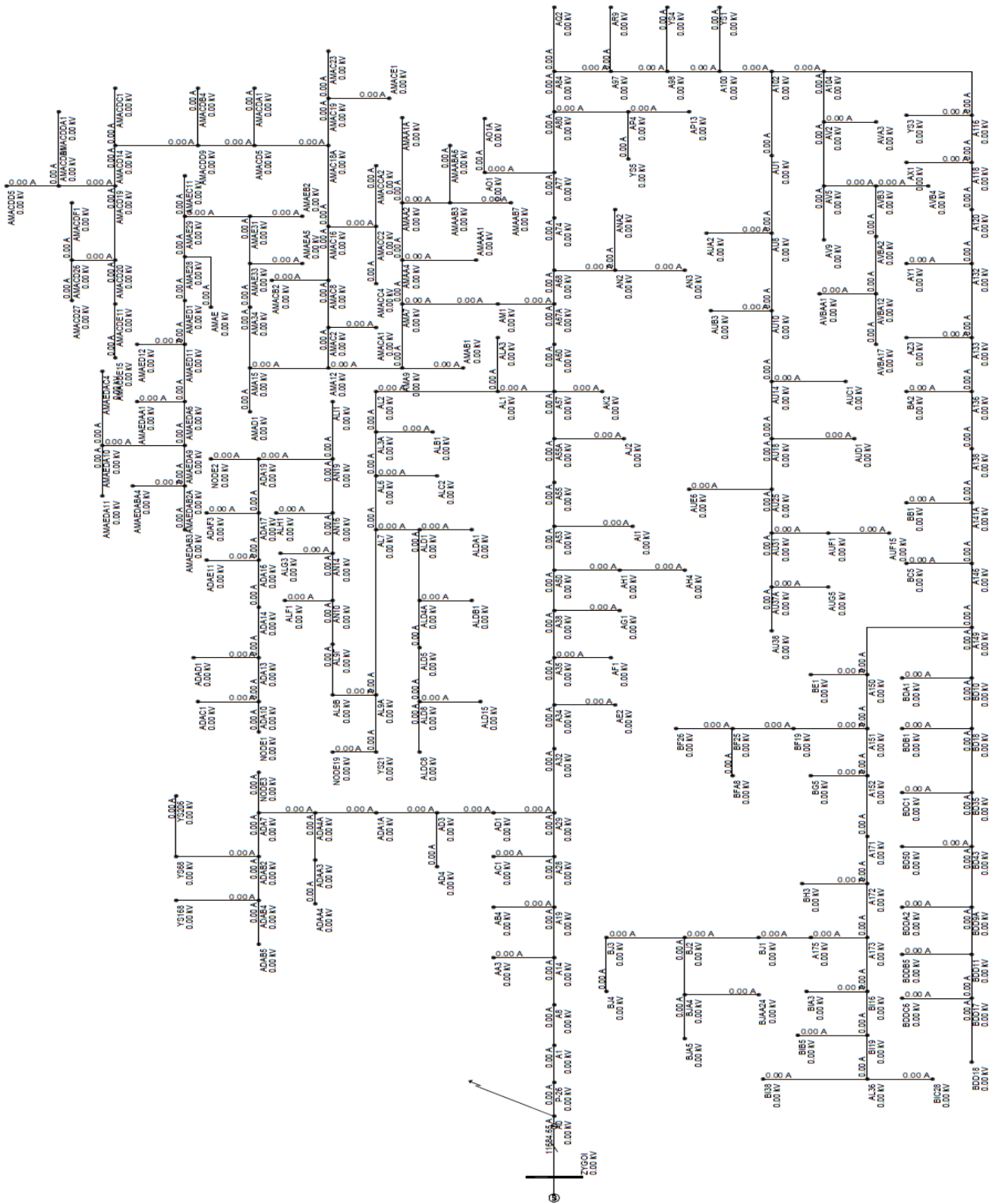
Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα αλληλουχίας σε σφάλματα φάσεων, των μέσων προστασίας της γραμμής (Σχήμα 5.24) καθώς και το διάγραμμα αλληλουχίας σε σφάλματα ως προς γη, των μέσων προστασίας της γραμμής (Σχήμα 5.25).

Επίσης παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο τριφασικό σφάλμα στην αρχή μιας διακλάδωσης, σε ενδιάμεση θέση του κορμού μεταξύ της αναχώρησης και του άκρου του Στο διάγραμμα επισημαίνεται και σχολιάζεται μία τιμή μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου τριφασικού σφάλματος (Σχήμα 5.26).

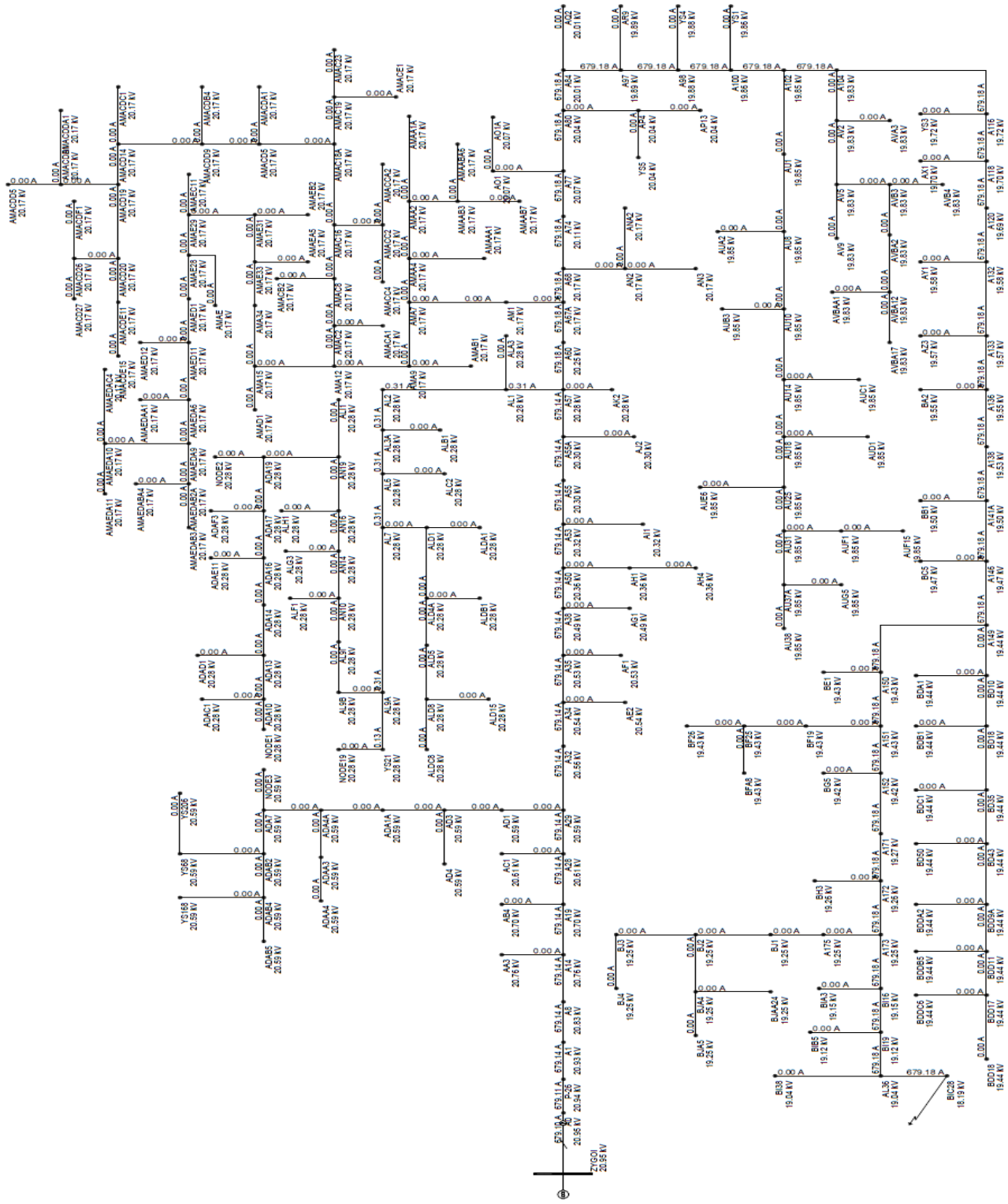
Η επιλογή των παραμέτρων για τη χάραξη της καμπύλης του ηλεκτρονόμου γίνεται με βάση όσα αναφέρθηκαν, με τη βοήθεια κατάλληλης καρτέλας του λογισμικού.



Σχήμα 5.18: Τιμές τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε κάθε κόμβο του δικτύου



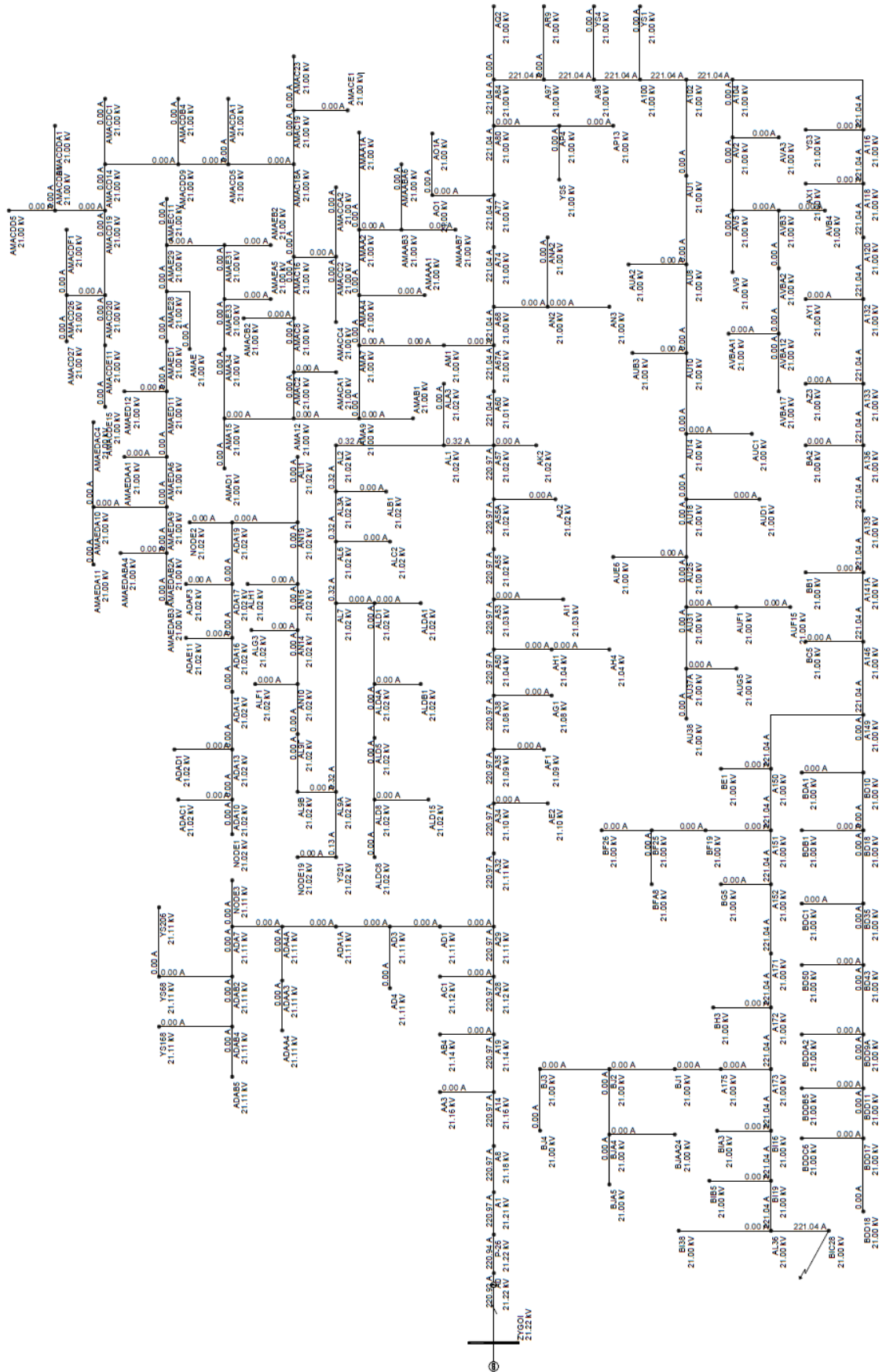
Σχήμα 5.19: Μέγιστο τριφασικό σφάλμα



Σχήμα 5.20: Ελάχιστο διαραστικό σφάλμα



Σχήμα 5.21: Μέγιστο σφάλμα φάσης με γη



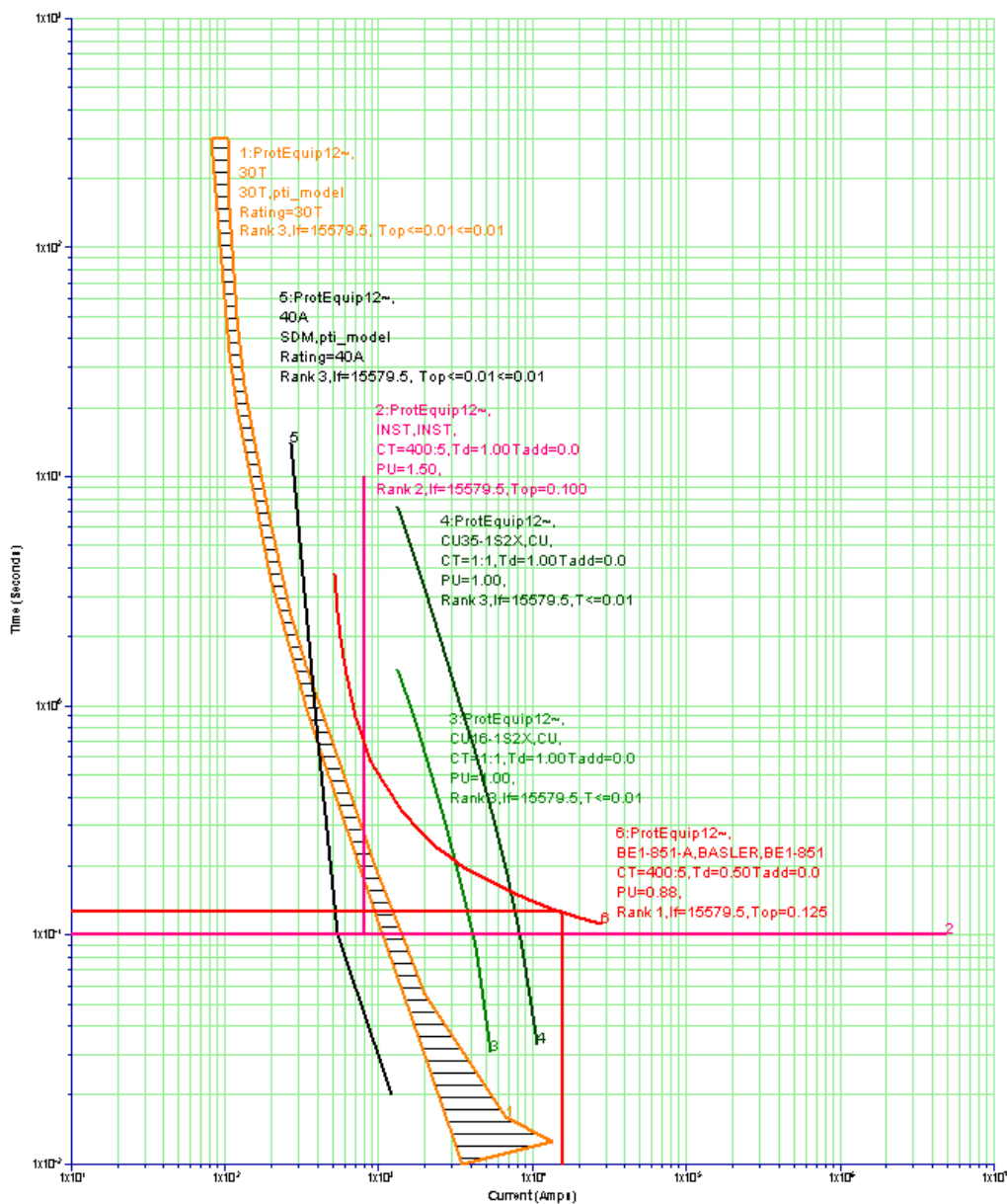
Σχήμα 5.22: Ελάχιστο σφάλμα γης



Σχήμα 5.23: Τριφασικό σφάλμα στην αρχή διακλάδωσης, σε ενδιάμεση θέση μεταξύ της αναχώρησης και του τέλους του κορμού της γραμμής

Διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο το μέγιστο τριφασικό σφάλμα

Time-Current Curves (kVRef = 15.00)



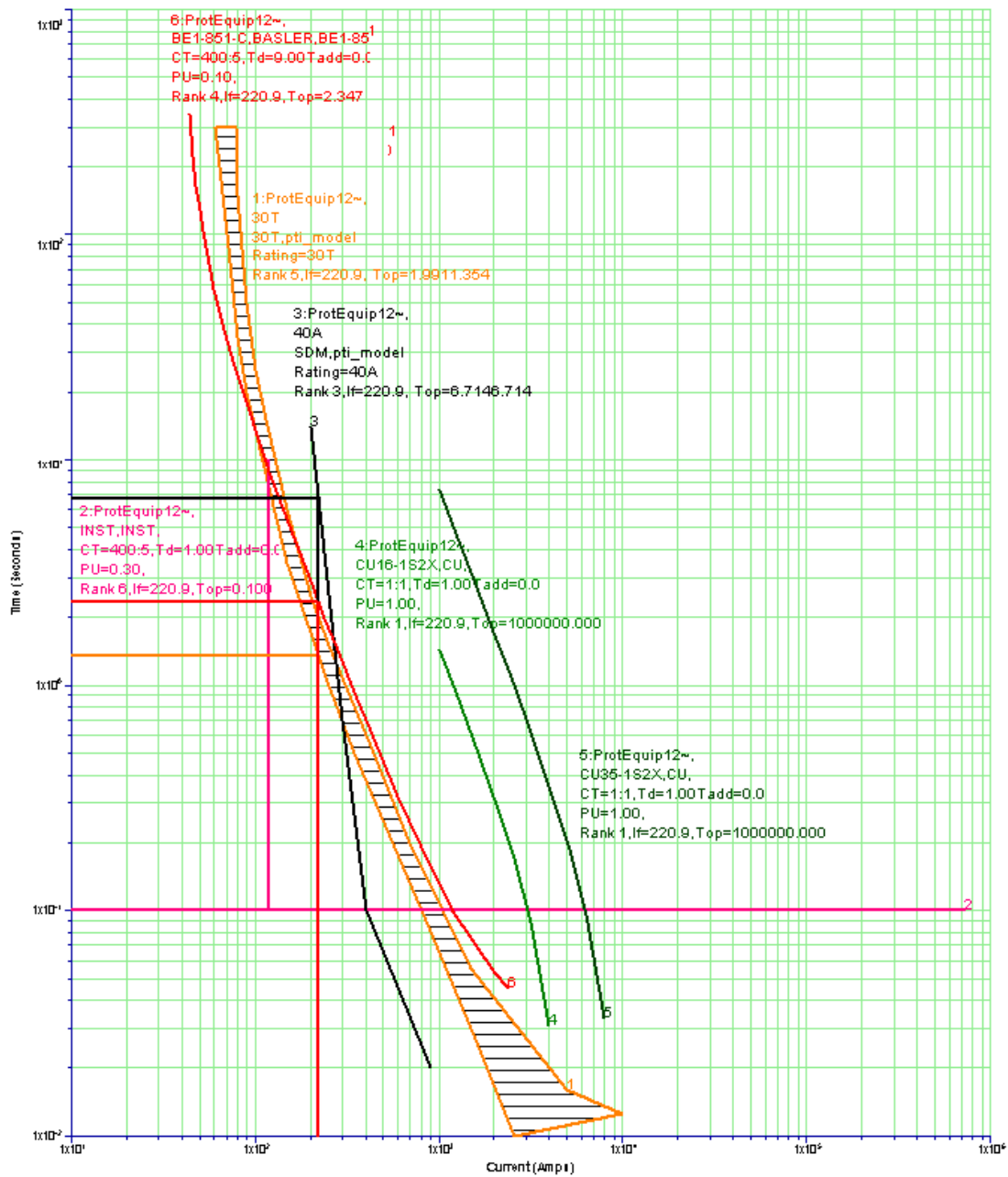
09/25/17 12:17

Plot	DeviceID	Branch	End	Current	Max Time	Min Time	Difference
6	BE1-85...	Switch9	A0	15579.534	0.125		
2	INST	Switch9	A0	15579.534	0.100		0.025
1	30T	Switch9	A0	15579.534	<= 0.01	<= 0.01	0.100
3	CU16-1...	Switch9	A0	15579.534	<= 0.01		0.000
4	CU35-1...	Switch9	A0	15579.534	<= 0.01		0.000
5	40A	Switch9	A0	15579.534	<= 0.01	<= 0.01	0.000

Σχήμα 5.24: Στο παραπάνω διάγραμμα αλληλουχίας φαίνονται οι καμπύλες των μέσων προστασίας που υπάρχουν στη γραμμή (ασφαλειών και ΔΙ) και η καμπύλη καταστροφής των αγωγών μικρότερης διατομής. Στον πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε μέσου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται το μέγιστο τριφασικό σφάλμα. Είναι προφανές ότι τα τηκτά 30T συνεργάζονται με τον Η/Ν του ΔΙ και ότι ο αγωγός με την ελάχιστη διατομή στο δίκτυο αυτό (16 Cu), καθώς και αυτός με την αμέσως μεγαλύτερη (35 Cu), έχουν χρόνο αντοχής πολύ μικρότερο από το χρόνο ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου της αναχώρησης για το συγκεκριμένο ρεύμα σφάλματος, το οποίο όμως εμφανίζεται στον κορμό, που αποτελείται εξολοκλήρου από αγωγό τύπου 95 Cu.

Διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη

Time-Current Curves (kVRef = 20.00)

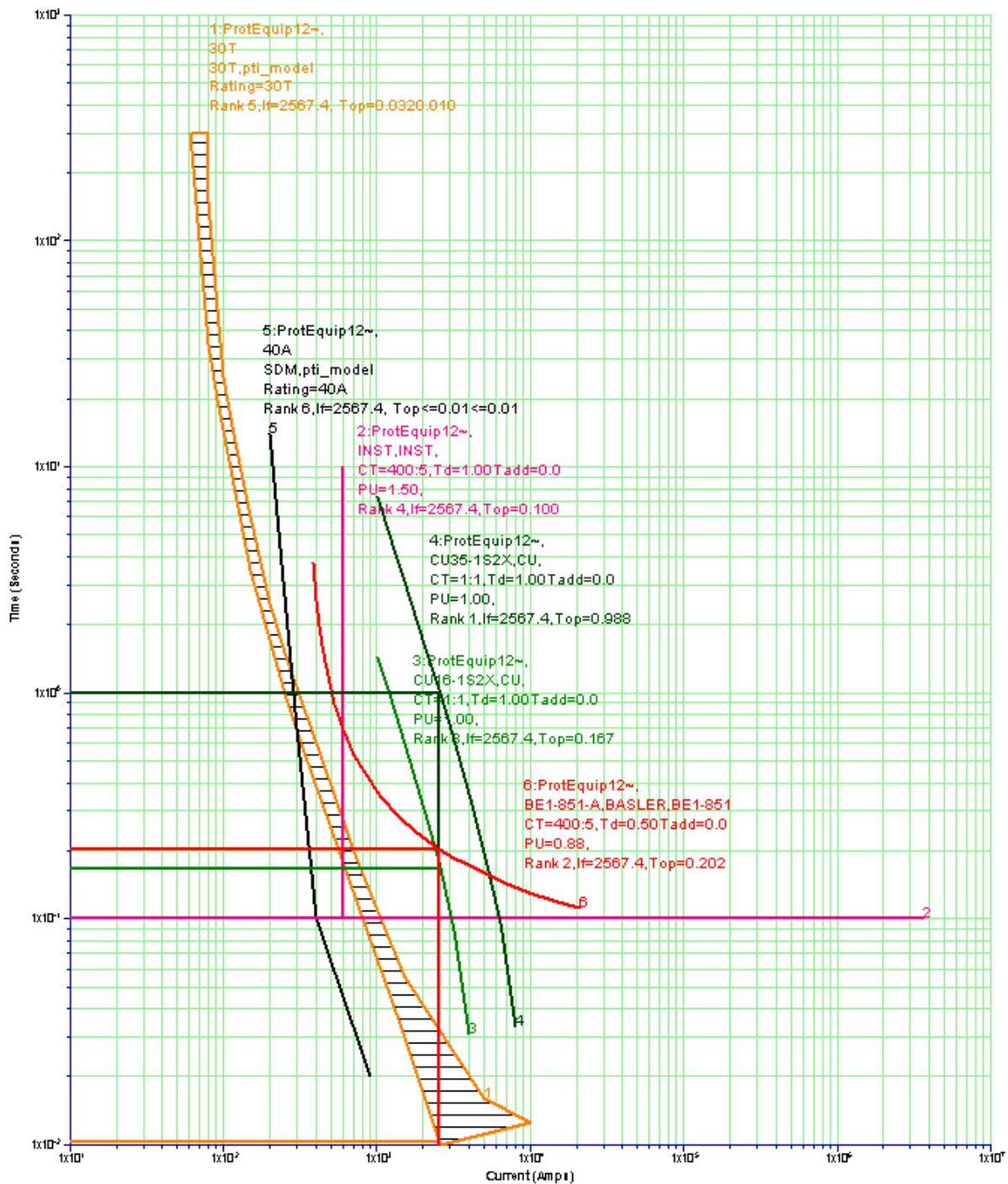


09/25/17 15:06

Plot	DeviceID	Branch	End	Current	Max Time	Min Time	Difference
4	CU16-1...	Switch9	A0	220.917	No-op		
5	CU35-1...	Switch9	A0	220.917	No-op		
3	40A	Switch9	A0	220.917	6.714	6.714	
6	BE1-85...	Switch9	A0	220.917	2.347		4.367
1	30T	Switch9	A0	220.917	1.991	1.354	0.356
2	INST	Switch9	A0	220.917	0.100		1.254

Σχήμα 5.25: Παραπάνω φαίνονται οι καμπύλες των μέσων προστασίας για σφάλματα ως προς γη, που υπάρχουν στη γραμμή (ασφαλειών και ΔΙ) και η καμπύλη καταστροφής των αγωγών με τις μικρότερες διατομές (16 Cu και 35 Cu). Στον πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε μέσου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη. Φαίνεται ότι για το ελάχιστο σφάλμα ως προς γη ο Η/Ν του ΔΙ συνεργάζεται οριακά με τα τηκτά 30T, που χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων στις διακλαδώσεις του δεδομένου δικτύου.

Διάγραμμα αλληλουχίας με σημειωμένο τριφασικό σφάλμα στην αρχή μιας διακλάδωσης, σε ενδιάμεση θέση του κορμού μεταξύ της αναχώρησης και του άκρου του



Plot	DeviceID	Branch	End	Current	Max Time	Min Time	Difference
4	CU35-1...	Switch9	A0	2567.356	0.988		
6	BE1-85...	Switch9	A0	2567.356	0.202		0.786
3	CU16-1...	Switch9	A0	2567.356	0.167		0.036
2	INST	Switch9	A0	2567.356	0.100		0.067
1	30T	Switch9	A0	2567.356	0.032	0.010	0.068
5	40A	Switch9	A0	2567.356	<= 0.01	<= 0.01	0.010

Σχήμα 5.26: Στο παραπάνω διάγραμμα αλληλουχίας φαίνονται οι καμπύλες των μέσων προστασίας που υπάρχουν στη γραμμή (ασφαλειών και ΔΙ) και η καμπύλες καταστροφής των αγωγών μικρότερης διατομής. Στον πίνακα φαίνονται οι χρόνοι ενεργοποίησης του κάθε μέσου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται τριφασικό σφάλμα στην αρχή διακλάδωσης, σε ενδιάμεση θέση του κορμού. Είναι προφανές, από το διάγραμμα ότι τα τηκτά 30T συνεργάζονται με τον H/N του ΔΙ, για την τιμή του σφάλματος και ότι ο αγωγός με την ελάχιστη διατομή στο δίκτυο αυτό (16 Cu), καθώς και αυτός με την αμέσως μεγαλύτερη (35 Cu), έχουν χρόνο αντοχής μεγαλύτερο από το χρόνο ενεργοποίησης των τηκτών 30T. Συνεπώς η διακλάδωση προστατεύεται επαρκώς με τηκτά 30T. Ακόμη και στην περίπτωση που ο αγωγός της διακλάδωσης ήταν τύπου 16 Cu, η διακλάδωση θα προστατευόταν αποτελεσματικά με τηκτά 30T. Σε περίπτωση όμως που δεν είχαν τοποθετηθεί τηκτά 30T στην αρχή της διακλάδωσης η τιμή του βραχυκυκλώματος θα προκαλούσε την τήξη του αγωγού 16 Cu, αφού από το διάγραμμα φαίνεται ότι ο ηλεκτρονόμος της αναχώρησης ενεργοποιείται ελάχιστα πιο μετά από την τήξη του αγωγού 16 Cu. Ωστόσο η διακλάδωση έχει κατασκευαστεί από αγωγό 35 Cu ο οποίος καταστρέφεται, για το δεδομένο ρεύμα, που είναι και το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος που μπορεί να εμφανιστεί στη διακλάδωση, σε χρόνο μεγαλύτερο τόσο από την τήξη των 35T, όσο και από την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου της αναχώρησης για το άνοιγμα του διακόπτη αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαννακόπουλος, Γ. Βοβός, Ν. (2008) *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη
- [2] Μπούρκας, Π. (1998) *Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων*. Αθήνα
- [3] Κυραναστάσης, Γ. (2001) *Σημειώσεις Βιομηχανικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Καβάλα: ΤΕΙ Καβάλας
- [4] Δερμόπουλος, Φ. Τσαραμιάδης, Π. (1982) *Δίκτυα, Σταθμοί, παραγωγή, μεταφορά, διανομή ενέργειας*. Αθήνα
- [5] Τεχνική περιγραφή ΔΕΗ 272, (Δεκέμβριος 2002) *ΔΑΕ (Διακόπτης Αυτομάτου Επαναφοράς) 20 kV εξωτερικού τύπου*.
- [6] IEC 62271/2012, (2012) *High voltage switchgear and controlgear*.
- [7] ANSI C37.42, (1969)
- [8] Τεχνική περιγραφή ΔΕΗ 271, (Δεκέμβριος 2002) *Τριπολικός διακόπτης φορτίου 20 kV εξωτερικού τύπου MT*.
- [9] Τεχνική περιγραφή ΔΕΗ 273, (Δεκέμβριος 2002) *Διακόπτες απομόνωσης 20 kV εξωτερικού τύπου*.
- [10] Τεχνική περιγραφή ΔΕΗ 286, (2004) *Μαχαιρωτές ασφάλειες XT*.
- [11] ΔΕΗ, (1995) *Οδηγός προγραμματισμού διανομής*.
- [12] Λαμπρόπουλος, Κ. (2002) *Μελέτη ηλεκτρικών δικτύων διανομής*. Αθήνα
- [13] ΔΕΗ, (1985) *Εγχειρίδιο Τυποποιημένων Κατασκευών Διανομής*. Αθήνα
- [14] Οδηγία Διανομής Νο26, (1990) *Επιτρεπόμενες φορτίσεις μεμονωμένων αγωγών καλωδίων και γυμνών αγωγών*. Έκδοση 2^η, ΔΕΗ/ ΔΕΔ/ΤΤΕ
- [15] Μπούρκας, Π. (2012) *Βιομηχανικές Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις*. Τόμος 2 (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων), Αθήνα

- [16] Soulinaris, G. Halevidis, C. Polykrati, A. Bourkas, P. *Evaluation of the thermal stresses and dielectric phenomena in the investigation of the causes of wildfires involving distribution power lines*, Electric Power Systems Research 117, 2014
- [17] Grainger, J. Stevenson, W. (2016) *power system analysis*. Mc Grow-Hill education
- [18] IEC Standard 865-1, (1993) *Short-circuit current– Calculation of effects*.
- [19] Οδηγία Διανομής Νο22, (1988) *Προστασία Μετασχηματιστών και Δικτύων Χαμηλής Τάσης*. ΔΕΗ/ ΔΕΔ/ΤΤΕ,
- [20] IEC 60287-2, (2015) *Electric cables - Calculation of the current rating*.