



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

**Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς
και διανομής**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Δ. Χαλεβίδης

Επιβλέπων: Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



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

Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Δ. Χαλεβίδης

Συμβουλευτική επιτροπή: Περικλής Δ. Μπούρκας
Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 2012.

.....
Π. Μπούρκας	Κ. Καραγιαννόπουλος	Ν. Θεοδώρου
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Δέρβος	Μ. Ιωαννίδου	Ι. Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Πυργιώτη
Επίκουρος Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών

.....
Κωνσταντίνος Δ. Χαλεβίδης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Δ. Χαλεβίδης, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών υπό την επίβλεψη του Ομότιμου Καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα. Οφείλω στο σημείο αυτό να τον ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθεια τόσο κατά την διάρκεια της φοιτήσεώς μου στην σχολή Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., καθώς και κατά την εκπόνηση της διδακτορικής αυτής διατριβής. Επίσης πρέπει να τον ευχαριστήσω για τον τρόπο σκέψης, τις συμβουλές και ευκαιρίες τις οποίες μου έδωσε.

Ακόμα, ευχαριστώ τους καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο και Νικόλαο Θεοδώρου που με υπομονή συμπαραστάθηκαν στην επίπονη προσπάθειά μου. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη σχολαστική μελέτη της εργασίας μου και τις επικοινωνητικές σχετικές τους παρατηρήσεις.

Χαλεβίδης Κωνσταντίνος
Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Περίληψη

Η διατριβή αυτή αφορά διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα εμφανιζόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής, τόσο κατά την κανονική λειτουργία τους όσο και κατά την εμφάνιση σφαλμάτων.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των θερμικών φαινομένων σε εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής.

Εξετάζεται το θέμα της αποκοπής αγωγού, και γίνεται μια προσπάθεια ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των συνεπειών της αποκοπής αγωγών του δικτύου διανομής (φάσεων και ουδέτερου) και ακολούθως επιδιώκεται η δημιουργία μιας μεθόδου προστασίας. Επίσης, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης αγωγών διανομής και μεταφοράς λόγω των κύκλων λειτουργίας των αυτόματων διακοπών. Ακόμα, γίνεται μια διερεύνηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς ξύλινων στύλων. Επιπροσθέτως αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος ροής φορτίου για συστήματα διανομής με κομμένο πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο, και γίνεται μια πειραματική διερεύνηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς ελαίου μετασχηματιστών μεταφοράς και διανομής έπειτα από την μεταφορά των μετασχηματιστών στο σημείο εγκαταστάσεώς τους. Ειδικότερα:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια διερεύνηση των συνεπειών από αποκοπή αγωγών του δικτύου διανομής (τόσο αγωγών φάσεως, όσο και ουδέτερου). Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται μέθοδοι προστασίας για την αντιμετώπιση των συνεπειών αυτών.

Στην συνέχεια, στο κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της θερμικής καταπόνησης αγωγών λόγω των κύκλων λειτουργίας των αυτόματων διακοπών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου.

Ακολούθως, στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται ένα νέο κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων για ξύλινους στύλους και επαληθεύεται μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσεται αλγόριθμος για ροή φορτίου δικτύου διανομής με κομμένο ουδέτερο.

Τελικώς, στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται πειραματική διερεύνηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς ελαίου μετασχηματιστών διανομής και μεταφοράς από την μεταφορά στο σημείο της εγκαταστάσεως τους.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έγιναν 3 προγράμματα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την διευκόλυνση των υπολογισμών και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα προγράμματα αυτά είναι: πρόγραμμα υπολογισμού της θερμικής καταπόνησης αγωγών του δικτύου μεταφοράς, πρόγραμμα υπολογισμού της θερμικής καταπόνησης αγωγών του δικτύου διανομής λόγω των κύκλων λειτουργίας των αυτόματων διακοπών, και πρόγραμμα υπολογισμού του βέλους κάμψεως αγωγών του δικτύου διανομής και μεταφοράς.

Τα σχόλια επί των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων που προαναφέρθηκαν δίνονται στο κεφάλαιο 7. Συγκεκριμένα, η αποκοπή και πτώση στο έδαφος αγωγού φάσεως (δικτύου διανομής) μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά, ενώ η αποκοπή αγωγού ουδετέρου μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή της τάσεως του ουδετέρου κατόντη του σημείου αποκοπής και σε διακυμάνσεις της τάσεως των εγκατεστημένων φορτίων. Η μηχανική καταπόνηση του ελαίου των μετασχηματιστών οδηγεί σε μειωμένη διηλεκτρική αντοχή, και πιθανή διάσπασή του. Τέλος, το αναπτυχθέν μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμικής καταπόνησης αγωγών λόγω των κύκλων λειτουργίας των αυτόματων διακοπών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αντοχής των αγωγών σε διάφορα σφάλματα. Στο όγδοο κεφάλαιο δίνεται περιληπτικά η προαναφερθείσα συνεισφορά της εργασίας (του 7^{ου} κεφαλαίου) στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές.

Abstract

This thesis investigates the dielectric and thermal phenomena in transmission and distribution lines, which manifest during their steady-state or transient operation.

An introduction to transmission and distribution networks is made in the first chapter. Specifically, a brief presentation of the thermal and dielectric phenomena manifesting in overhead and underground lines is made.

The aim of this thesis is: the development of a model for the calculation of the open conductor effects (phase or neutral conductor) and the proposal of a protection method for the mitigation of the aforementioned effects, the development of a mathematical model for the calculation of the thermal effect of the recloser operation cycle on conductors. and the experimental investigation of the dielectric behavior of transformer oil after the transformer transportation to its installation point.

Chapter 2 develops a mathematical model for the calculation of the open conductor effects (phase or neutral conductor). Additionally, protection methods are presented for the mitigation of said effects. Chapter 3 develops a novel model for the calculation of the thermal effect of the recloser operation cycle on conductors. Chapter 4 develops a novel ladder network for wooden poles and verifies it through Finite Element Analysis. Chapter 5 presents a power flow algorithm for four-wire distribution systems with an abruptly multiply-grounded conductor. Finally, chapter 6 presents the results of the experimental investigation of the dielectric behavior of transformer oil after the transformer transportation to its installation point.

Within the framework of this thesis, three computer programs have been developed in order to facilitate the calculations and the extraction of conclusions. The programs are: program for the calculation of the short-circuit thermal effect on transmission conductors, program for the calculation of the thermal effect of the recloser operation cycle on conductors, program for the calculation of the conductor temperature rise during a fire, program for the calculation of transmission and distribution line conductor sag.

Discussion of the experimental and theoretical results is made in chapter 7. Specifically, the abruption and fall to the ground of a phase conductor can lead to a fire, whilst the abruption of the neutral conductor leads to neutral shift downstream of the abruption point and to voltage sags and swells. The mechanical stressing of the

transformer oil leads to decreased breakdown strength. Finally, the developed mathematical model for the calculation of the thermal effect of the recloser operation cycle on conductors can be used to assess the conductor ability to withstand faults. The eighth chapter presents the contribution of this thesis to further research as well as practical applications.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	5
Περίληψη	7
Abstract.....	9
1. Εισαγωγή	15
1.1. Συστήματα μεταφοράς και διανομής	16
1.1.1. Γραμμές μεταφοράς	16
1.1.2. Γραμμές διανομής.....	17
1.2. Θερμικά φαινόμενα σε υπαίθριες γραμμές μεταφοράς και διανομής.....	19
1.2.1. Στατικό ονομαστικό ρεύμα αγωγών	19
1.2.2. Δυναμικό ονομαστικό ρεύμα αγωγών	21
1.2.3. Αύξηση θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα.....	22
1.3. Μοντελοποίηση εναέριων και υπόγειων γραμμών	26
1.3.1. Πίνακας αντιστάσεων σειράς.....	26
1.3.2. Πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων	27
1.3.3. Ακριβής αναπαράσταση τμήματος γραμμής μεταφοράς ή διανομής ...	28
1.4. Διηλεκτρικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής	30
1.4.1. Διηλεκτρικά φαινόμενα στύλων διανομής.....	30
1.4.2. Στεμματοειδείς εκκενώσεις (φαινόμενο Corona)	31
1.4.3. Μερικές εκκενώσεις επί μονωτήρων	34
2. Μέθοδος προστασίας από πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού δικτύου διανομής.....	38
2.1. Η επιλογή των ασφαλειών στους πίνακες χαμηλής τάσης των υποσταθμών διανομής.....	38
2.2. Οι πλέον πιθανές περιπτώσεις αποκοπής αγωγού.....	42
2.3. Αποκοπή ενός αγωγού φάσης.....	45
2.3.1 Υπολογισμός του ρεύματος προς γη.....	45

2.3.2. Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στην αντίσταση επαφής.....	47
2.4. Σχόλια	49
2.5. Μία προτεινόμενη μέθοδος προστασίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος κατά την αποκοπή αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης	50
3. Αύξηση θερμοκρασίας από τον κύκλο λειτουργίας αυτόματων διακόπτων ελαίου και διακοπτών αυτόματης επαναφοράς.....	52
3.1. Μέθοδος υπολογισμού αυξήσεως θερμοκρασίας	52
3.2. Εφαρμογή της μεθόδου.....	54
3.3. Αποτελέσματα.....	57
3.4. Αριθμητική μέθοδος	64
4. Ανάπτυξη κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων ξύλινου στύλου και επαλήθευση αυτού μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων	68
4.1. Περιγραφή ξύλινων στύλων.....	68
4.2. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	69
4.3. Κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων.....	74
4.4. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων	79
5. Ροή φορτίου συστημάτων διανομής με κομμένο πολλαπλά-γειωμένο ουδέτερο.....	81
5.1. Προτεινόμενος αλγόριθμος.....	82
5.1.1. Μοντελοποίηση δρόμου επιστροφής.....	83
5.1.2. Επαναληπτικός βρόγχος.....	84
5.2. Εφαρμογή του αλγορίθμου	87
5.3. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων	97
6. Διερεύνηση των συνεπειών στην διηλεκτρική αντοχή του λαδιού εξαιτίας της μεταφοράς των μετασχηματιστών στην θέση εγκατάστασης τους και της επακόλουθης ψυχρής εκκίνησης.....	100
6.1. Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα	101

6.1.1. Επίδραση της μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης.....	102
6.1.2. Επίδραση της θερμοκρασίας.....	104
6.2. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων	106
6.2.1. Σχόλια επί της επίδρασης της μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης.	106
6.2.2. Σχόλια επί της επίδρασης της θερμοκρασίας.....	107
7. Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων	109
7.1. Σχόλια επί της μεθόδου προστασίας από πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού δικτύου διανομής.....	109
7.2. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της μεθόδου υπολογισμού της αύξησεως της θερμοκρασίας από τον κύκλο λειτουργίας των διακοπών αυτόματης επαναφοράς.....	109
7.3. Σχόλια επί του προτεινόμενου κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων ξύλινου στύλου και της επαλήθευσης αυτού μέσω αναλύσεως πεπερασμένων στοιχείων	110
7.4. Σχόλια επί του προτεινόμενου αλγορίθμου ροής φορτίου συστημάτων διανομής με αποκοπή του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου.....	110
7.5. Σχόλια επί της πειραματικής διερεύνησης των συνεπειών στην διηλεκτρική αντοχή του λαδιού εξαιτίας της μεταφοράς μετασχηματιστών ελαίου στην θέση εγκαταστάσεως τους και της επακόλουθης ψυχρής εκκινήσεως τους.....	111
8. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές	112
Παραρτήματα.....	114
Παράρτημα Ι. Ένα πρόγραμμα υπολογισμού του βέλους κάμψεως.....	114
1. Καμπύλη του αγωγού και βέλος κάμψεως	114
2. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος	116
Παράρτημα ΙΙ. Δυο προγράμματα υπολογισμού της αύξησης θερμοκρασίας αγωγών εναερίων δικτύων μεταφοράς και διανομής	118
1. Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως	119
2. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος υπολογισμού αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών δικτύων μεταφοράς.....	120

3. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος υπολογισμού αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών δικτύων διανομής από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς.....	121
Βιβλιογραφία	123

1. Εισαγωγή

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) περιλαμβάνουν το σύνολο των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν στους σταθμούς παραγωγής, και στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Η εύρυθμη λειτουργία του δικτύου έγκειται στην μεταβατική ευστάθειά του, και την έγκαιρη αποκατάσταση των όποιων σφαλμάτων.

Η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος αφορά την δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος σε κατάσταση ισορροπίας μετά από μια διαταραχή (όπως απώλεια γραμμής μεταφοράς, σταθμού παραγωγής κτλ.).

Τα σφάλματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, αναλόγως της αιτίας εκδήλωσέως τους, σε δυο κατηγορίες:

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει σφάλματα τα οποία εκδηλώνονται λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων και άλλων τυχαίων εξωγενών παραγόντων. Γι' αυτό ο σχεδιασμός και η κατασκευή των γραμμών μεταφοράς και διανομής γίνεται ούτως ώστε να ανταπεξέρχονται τα ανωτέρω σφάλματα.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει σφάλματα τα οποία εκδηλώνονται κατά την διαχρονική λειτουργία μιας εγκατάστασης και τα οποία οφείλονται κυρίως σε θερμικά ή διηλεκτρικά ή μηχανικά αίτια (όπως π.χ. η αύξηση της θερμοκρασίας σε στατικό σύνδεσμο λόγω οξειδώσεώς του, ή μείωσης του μήκους ερπυσμού σε μονωτήρες λόγω ξένων επικαθίσεων, ή μείωση της μηχανικής αντοχής γυμνού αγωγού αλουμινίου από σκάγια κυνηγετικών όπλων, κλπ. [1-4]). Για την αποφυγή των σφαλμάτων της δεύτερης κατηγορίας, η συντήρηση του δικτύου πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τον Κανονισμό Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ) και τις σχετικές οδηγίες που αφορούν τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας [5].

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μία σύντομη αναφορά στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής και περιγράφονται τα διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα που συναντώνται στο περιβάλλον τους.

1.1. Συστήματα μεταφοράς και διανομής

Ο σχεδιασμός των συστημάτων μεταφοράς και διανομής είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις (από τους σταθμούς παραγωγής έως τον τελικό καταναλωτή) με μικρές απώλειες. Ανά τον κόσμο έχουν διαμορφωθεί πλήθος διαφορετικών τύπων συστημάτων μεταφοράς και διανομής. Στον ελλαδικό χώρο, γίνεται ανύψωση της τάσεως στην έξοδο των σταθμών παραγωγής (στα 150 kV ή στα 400 kV). Στην συνέχεια, στα κέντρα υψηλής τάσης (KYT) η τάση υποβιβάζεται στα 20 kV και διανέμεται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (γραμμές κορμού). Από τις γραμμές αυτές ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές διανομής, οι οποίοι υποβιβάζουν την τάση στα 0,4 kV. Τελικώς, οι καταναλωτές χαμηλής τάσεως συνδέονται στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσεως. Εκτός των καταναλωτών χαμηλής τάσεως υπάρχουν και καταναλωτές μέσης τάσεως όταν τα φορτία ανά φάση είναι μεγαλύτερα από 200 A.

1.1.1. Γραμμές μεταφοράς

Γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για την μεταφορά μεγάλης ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής προς τους υποσταθμούς που βρίσκονται κοντά στις καταναλώσεις. Η πλειονότητα των γραμμών χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ωστόσο, ζεύξεις υψηλής τάσεως συνεχούς ρεύματος (HVDC) χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (μεγαλύτερες των 600 km). Ακόμα, οι ζεύξεις HVDC έχουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας απομόνωσης των συζευγμένων μερών του δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών με στόχο την αποφυγή ολικού black-out [2].

Οι γραμμές μεταφοράς είναι συνήθως εναέριες, καθώς οι υπόγειες γραμμές είναι ακριβότερες. Ωστόσο, υπόγειες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται σε αστικές περιοχές. Η μεταφορά πραγματοποιείται σε υψηλά επίπεδα τάσεως (πάνω από 110 kV) ούτως ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες [2].

1.1.2. Γραμμές διανομής

Στην συνέχεια, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των δικτύων διανομής, όπως αυτά σχεδιάζονται και κατασκευάζονται στον ελλαδικό χώρο. Από τον μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150 kV/20 kV, 25 ή 50 MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R23) [1].

Καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) ή ασφαλειών, οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού. Οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσεως σε χαμηλή τάση (20 kV / 400 V, 230 V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων ισχύος συνήθως μέχρι 400 kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσεως ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Οι διακοπές ηλεκτροδότησης των καταναλωτών οφείλονται σε μεγάλο ποσοστό σε σφάλματα στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης [6]. Η χρήση διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) και αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) για την προστασία γραμμών διανομής μέσης τάσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας του δικτύου (SAIDI, SAIFI, κ.ά.) [6, 7]. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των ΑΔΕ και ΔΑΕ, οι οποίοι όταν εντοπίσουν σφάλμα προς γη ή φάση με χρονική διάρκεια μεγαλύτερη από ένα καθορισμένο όριο διακόπτουν το κύκλωμα και στην συνέχεια ξανακλείνουν για να επαναφέρουν το κύκλωμα. Αν το σφάλμα εξακολουθεί να υπάρχει, ο διακόπτης επαναλαμβάνει τον κύκλο «άνοιγμα-

κλείσιμο» για ακόμα δυο φορές και στην συνέχεια διακόπτει οριστικά την τροφοδότηση της γραμμής. Οι διακόπτες πραγματοποιούν είτε δυο γρήγορες και δυο αργές λειτουργίες είτε μια γρήγορη και τρεις αργές λειτουργίες και η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις λειτουργίες είναι 1 – 2 δευτερόλεπτα. Η πλειονότητα των σφαλμάτων σε εναέρια δίκτυα είναι παροδικά και διαρκούν το πολύ λίγα δευτερόλεπτα [8]. Έτσι, τόσο ο αυτόματος διακόπτης ελαίου όσο και ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς αποτρέπουν την διακοπή ηλεκτροδότησης μιας γραμμής εξαιτίας ενός παροδικού σφάλματος, που μπορεί να συμβεί π.χ. κατά την πτώση ενός κλαδιού δέντρου πάνω στην γραμμή κατά την πτώση προς την γη.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400 V, 230 V) σε πελάτες χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού. Η χρήση συνεστραμμένων καλωδίων είναι προτιμότερη καθώς σε περίπτωση αποκοπής του καλωδίου, η πιθανότητα ηλεκτροπληξίας είναι μειωμένη [8], όπως μειωμένη είναι και η πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, έναντι της αποκοπής γυμνών αγωγών.

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200A ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κτήρια ΑΕΙ, κ.λ.π..

Στη μέση τάση και στη χαμηλή τάση χρησιμοποιούνται ξύλινοι στύλοι και μερικές φορές στις πόλεις, τσιμεντένιοι (και σπανιότερα μεταλλικοί). Τα υλικά και η εγκατάσταση κάθε ξύλινου στύλου είναι τυποποιημένα. Οι ξύλινοι στύλοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάρτηση των εναερίων δικτύων μέσης τάσης. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος τους και στην ευκολότερη συγκριτικά μεταφορά τους σε δυσπρόσιτα μέρη.

Οι τραβέρσες που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τους ξύλινους στύλους είναι ξύλινες, σιδερένιες, ή fiberglass. Οι ξύλινες τραβέρσες εμφανίζουν καλύτερη διηλεκτρική συμπεριφορά αυξάνοντας την τάση υπερπήδησης ως δευτερεύον σύστημα μόνωσης (Critical Flashover Voltage) [9]. Ωστόσο, το ξύλο όταν βραχεί χάνει την μονωτική ικανότητά του (υψηλή υγρασία moisture content), και σε συνδυασμό με ρυπαθέντα μονωτήρα (υπό συνθήκες υψηλής υγρασίας ή βροχής) επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών ρευμάτων διαρροής. Οι σιδερένιες τραβέρσες χρησιμοποιούνται για την αυξημένη μηχανική αντοχή που προσφέρουν. Αντιθέτως, οι ξύλινες τραβέρσες χάνουν σημαντικό μέρος της μηχανικής αντοχής τους με την πάροδο του χρόνου [10, 11].

1.2. Θερμικά φαινόμενα σε υπαίθριες γραμμές μεταφοράς και διανομής

1.2.1. Στατικό ονομαστικό ρεύμα αγωγών

Η θερμοκρασία ενός αγωγού σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας μπορεί να βρεθεί από την επίλυση της σχέσης [12-14]:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c) \quad (1.2.-1)$$

όπου q_c είναι η απαγωγή θερμότητας μέσω συναγωγής, q_r η απαγωγή θερμότητας μέσω ακτινοβολήσης, q_s η προσληφθείσα ηλιακή θερμότητα, I το ρεύμα φόρτισης, και $R(T_c)$ η αντίσταση του αγωγού στην θερμοκρασία T_c ανά μονάδα μήκους.

Η απαγωγή θερμότητας μέσω συναγωγής δίνεται ως [12]:

$$q_{c,l} = [1,01 + 0,0372 \left(\frac{D\rho_f v}{\mu_f}\right)^{0,52}] k_f K_{angle} (T_c - T_{amb}) \quad (1.2.-2)$$

$$q_{c,h} = [0,0119 \left(\frac{D\rho_f v}{\mu_f}\right)^{0,6} k_f K_{angle} (T_c - T_{amb})] \quad (1.2.-3)$$

$$q_{c,n} = 0,0205 \rho_f^{0,5} D^{0,75} (T_c - T_{amb})^{1,25} \quad (1.2.-4)$$

όπου $q_{c,l}$ και $q_{c,h}$ η απώλεια θερμότητας λόγω συναγωγής σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες αέρα, αντίστοιχα, $q_{c,n}$ η απώλεια θερμότητας λόγω φυσικής συναγωγής, D η διάμετρος του αγωγού, ρ_f η πυκνότητα του αέρα, v η ταχύτητα του ανέμου, μ_f το δυναμικό ιξώδες του αέρα, k_f η θερμική αγωγιμότητα του αέρα, K_{angle} ο συντελεστής διεύθυνσης του ανέμου, και T_{amb} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η μεγαλύτερη από τις τρεις απώλειες χρησιμοποιείται ως το q_c .

Ο συντελεστής διεύθυνσης του ανέμου δίνεται ως [12]:

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\varphi) + 0,194 \cos(2\varphi) + 0,368 \sin(2\varphi) \quad (1.2.-5)$$

όπου φ η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα του αγωγού.

Η απαγωγή θερμότητας μέσω ακτινοβολήσης δίνεται ως [12]:

$$q_r = 0,0178D\varepsilon\left[\left(\frac{T_c + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100}\right)^4\right] \quad (1.2.-6)$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής. Η μέγιστη ροή ηλιακής θερμότητας ανά μονάδα μήκους αγωγού για ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας 1000 μέτρων είναι [12]:

$$q_s = 0,572D \quad (1.2.-7)$$

Ας σημειωθεί πως όσο μειώνεται το ύψος του αγωγού από την επιφάνεια της θάλασσας μειώνεται και η προσληφθείσα ηλιακή θερμική ισχύς.

Η θερμική αγωγιμότητα, το δυναμικό ιξώδες, και η πυκνότητα του αέρα μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$k_f = 2,424 \times 10^{-2} + 7,477 \times 10^{-5} T_{film} - 4,407 \times 10^{-9} T_{film}^2 \quad (1.2.-8)$$

$$\mu_f = \frac{1,458 \times 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383,4} \quad (1.2.-9)$$

$$\rho_f = \frac{1,293}{1 + 0,00367 T_{film}} \quad (1.2.-10)$$

όπου T_{film} η θερμοκρασία στην διεπιφάνεια αγωγού και αέρα. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$T_{film} = \frac{T_c + T_{amb}}{2} \quad (1.2.-11)$$

Τελικώς, με δεδομένες τις ακραίες καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) και την οριακή θερμοκρασία ασφαλείας (η οποία καθορίζεται ούτως ώστε να μην προκαλείται παραβίαση των αποστάσεων ασφαλείας, ή απώλεια της μηχανικής αντοχής των αγωγών [15]), μπορεί να υπολογιστεί το στατικό ονομαστικό ρεύμα. Για τον υπολογισμό αυτό, απαιτείται η επίλυση της (1.2.-1), ως προς το ρεύμα φόρτισης. Προκύπτει [16]:

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (1.2.-12)$$

Διεξοδικότερη ανάλυση των μηχανισμών προσαγωγής και απαγωγής της θερμότητας, που αναφέρθηκαν καθώς και επιπρόσθετων μηχανισμών, οι οποίοι είτε εμφανίζονται τυχαία και μπορούν να αντιμετωπιστούν στοχαστικά (θέρμανση από ιονισμό του περιβάλλοντος αέρα και απαγωγή θερμότητας μέσω εξάτμισης) είτε μπορούν να αμεληθούν εξαιτίας του μεγέθους τους (φερρομαγνητική θέρμανση), μπορεί να αναζητηθεί στην βιβλιογραφία [17].

Ο υπολογισμός του στατικού ονομαστικού ρεύματος μιας γραμμής προαπαιτεί μία σειρά παραδοχών για τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Χαρακτηριστικώς, το τεχνικό φυλλάδιο CIGRE 207 [18] προτείνει:

- Ηλιακή ακτινοβολία 890 W/m²
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C
- Ταχύτητα ανέμου 0,5 m/s

Ας σημειωθεί ότι κάθε εταιρία ηλεκτρισμού χρησιμοποιεί διαφορετικές παραδοχές για τις καιρικές συνθήκες, ούτως ώστε να υπερκαλύπτει τις καιρικές συνθήκες με χρόνο επιστροφής της τάξεως των 50 ετών.

1.2.2. Δυναμικό ονομαστικό ρεύμα αγωγών

Η διαφορική εξίσωση, η οποία περιγράφει την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας του αγωγού είναι:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [I^2 R(T_c) + q_s - q_c - q_r] \quad (1.2.2.-1)$$

όπου m η μάζα του αγωγού ανά μονάδα μήκους, C_p η θερμοχωρητικότητα του αγωγού ανά μονάδα μήκους, και t ο χρόνος. Εξαιτίας των εκθετών, διάφορων της μονάδας, στις οποίες υψώνεται η θερμοκρασία (μη γραμμικοί όροι), η αναλυτική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης είναι δύσκολη. Ωστόσο, μπορεί να εφαρμοστεί αριθμητική μέθοδος.

Το μεγάλο κόστος για τον σχεδιασμό, και κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής έχει δημιουργήσει την ανάγκη για φόρτιση των ήδη υπαρχόντων γραμμών στα όρια ασφαλείας. Ακόμα, γίνονται προσπάθειες για την αύξηση των ορίων μέσω του καθορισμού του ονομαστικού ρεύματος των αγωγών σε πραγματικό χρόνο (δυναμικό ονομαστικό ρεύμα) [19]. Το δυναμικό ονομαστικό ρεύμα είναι μεγαλύτερο του στατικού, σε περιόδους με έντονους ανέμους [20].

Για τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος σε πραγματικό χρόνο έχουν αναπτυχθεί μια σειρά μεθόδων. Χαρακτηριστικά, έχει προταθεί και υλοποιηθεί πιλοτικά η ενσωμάτωση μετεωρολογικών σταθμών σε κρίσιμες γραμμές μεταφοράς, ούτως ώστε να καταγράφονται οι καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, και η ηλιακή ακτινοβολία). Στην συνέχεια, μέσω συστήματος GPRS γίνεται μετάδοση των δεδομένων και υπολογισμός του δυναμικού ονομαστικού ρεύματος [21]. Επιπλέον, έχουν ενσωματωθεί συστήματα τα οποία καταγράφουν την θερμοκρασία και την φόρτιση των αγωγών. Τοιουτοτρόπως, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας αγωγού και της μετρούμενης [22].

Εξαιτίας του μεγάλου μήκους των γραμμών μεταφοράς, σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό συστήματος παρακολούθησης του ονομαστικού ρεύματος είναι η επιλογή των ανοιγμάτων στα οποία θα τοποθετηθεί ο εξοπλισμός. Ο εξοπλισμός συνήθως τοποθετείται σε περιοχές με μικρές ταχύτητες ανέμου, καθώς είναι οι πιο πιθανές να παρουσιάσουν μεγάλες αυξήσεις θερμοκρασίας και περιορίζουν το ονομαστικό ρεύμα όλης της γραμμής [21].

1.2.3. Αύξηση θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα

Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την μέθοδο του προτύπου IEC 865-1 [23]. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 865-1 η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\theta = \frac{\frac{S_{in}^2 \times l \times a}{k \times \rho \times c} - 1}{a} \quad (1.2.3.-1)$$

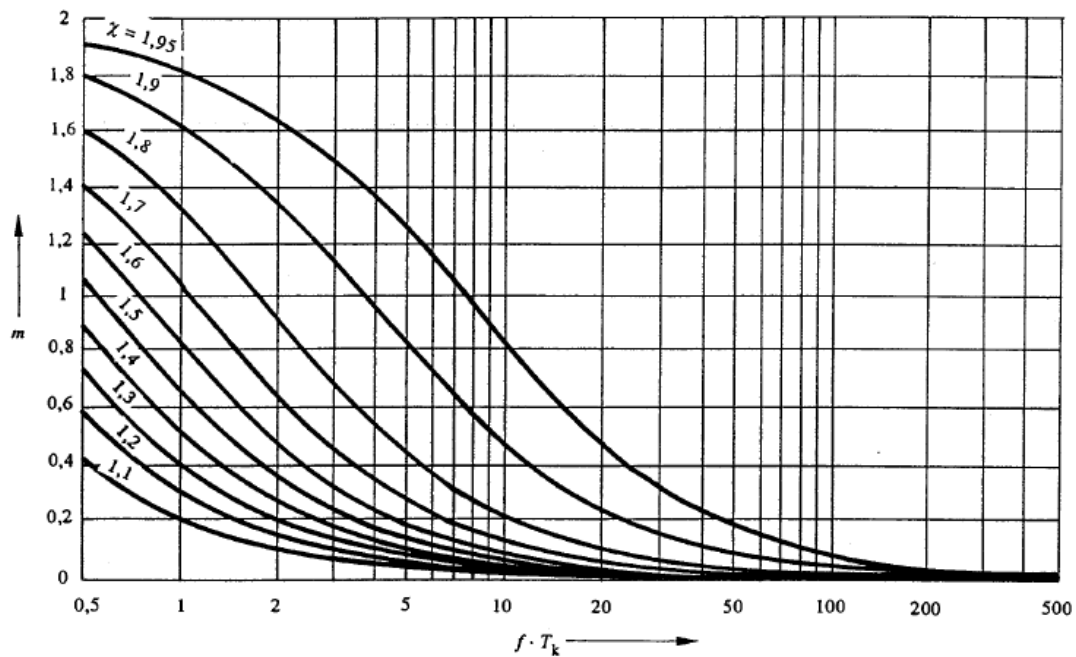
όπου S_{th} η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, t ο χρόνος μέχρι την διακοπή του βραχυκυκλώματος από το διακοπτικό μέσο, α ο θερμικός συντελεστής της αντίστασης, κ η αγωγιμότητα του αγωγού, ρ η πυκνότητα του αγωγού, και c η θερμοχωρητικότητα του αγωγού. Η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης S_{th} υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_{th} = I_{th} / A \quad (1.2.3.-2)$$

όπου A η διατομή του αγωγού, και I_{th} είναι το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης για το οποίο ισχύει:

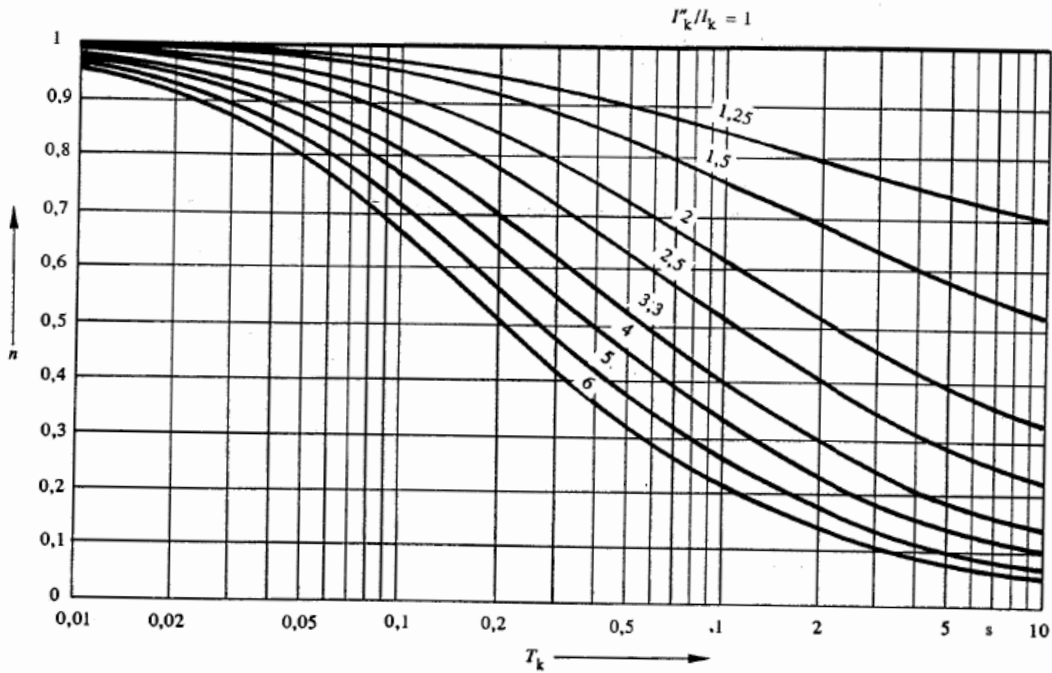
$$I_{th} = I_{sc}'' \sqrt{m+n} \quad (1.2.3.-3)$$

όπου I_{sc}'' είναι το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά την υπομεταβατική περίοδο, m ο συντελεστής της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης, και n ο συντελεστής της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από τα σχήματα 1.2.3-1 και 1.2.3-2 αντίστοιχα.



Σχήμα 1.2.3-1: Συντελεστής m της dc συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης [23].

f : θεμελιώδης συχνότητα T_k : χρονική διάρκεια του σφάλματος



Σχήμα 1.2.3-2: Συντελεστής n της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης [23].

T_k : χρονική διάρκεια του σφάλματος

Για την εύρεση του συντελεστή m μέσω του σχήματος 1.2.3-1 απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή χ ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\chi = 1,02 + 0,98 \times e^{-R_{sc}/X_{sc}} \quad (1.2.3.-4)$$

όπου R_{sc} και X_{sc} η ωμική και επαγωγική αντίσταση μέχρι τη θέση του σφάλματος. Εναλλακτικώς, ο συντελεστής m μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [23, 24]:

$$m = \frac{\exp(4ft \ln[0,02 + 0,98 \exp(-3R_{sc}/X_{sc})]) - 1}{2ft \ln[0,02 + 0,98 \exp(-3R_{sc}/X_{sc})]} \quad (1.2.3.-5)$$

όπου f η θεμελιώδης συχνότητα.

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως εμφανίζεται αρχικά κατά την υπομεταβατική και μεταβατική περίοδο ως ασύμμετρο, ενώ στην συνέχεια ως συμμετρικό στην περίοδο μόνιμης κατάστασης. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}^* και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_g . Το συμμετρικό τμήμα αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} .

Η τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος δίνεται από την σχέση:

$$I_{sc}^n = \frac{\beta \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{sc}} \quad (1.2.3.-6)$$

όπου U_N η ονομαστική τάση στην θέση του σφάλματος, Z_{sc} η συνολική αντίσταση του σφάλματος, και β ο συντελεστής διακυμάνσεως της τάσεως.

Πολλές εργασίες έχουν δημοσιευθεί με αντικείμενο την αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών και καλωδίων του δικτύου από ρεύματα βραχυκύκλωσης [25-27]. Ωστόσο, δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς η θερμική καταπόνηση από επαναλαμβανόμενα βραχυκυκλώματα (όπως συμβαίνει κατά την λειτουργία των ΑΔΕ και ΔΑΕ). Συγκεκριμένα, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η θερμική καταπόνηση των αγωγών από τις τέσσερις λειτουργίες των ΑΔΕ και ΔΑΕ. Η πρακτική των εταιριών ηλεκτρισμού όπως και οι διεθνείς κανονισμοί χρησιμοποιούν το άθροισμα της χρονικής διάρκειας των επιμέρους σφαλμάτων για τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης και δεν λαμβάνουν υπ' όψιν την επίδραση της μιας λειτουργίας του διακόπτη στις επόμενες. Δεν λαμβάνουν υπ' όψιν την αυξημένη αντίσταση των αγωγών (εξαιτίας της αυξημένης τους θερμοκρασίας από το πρώτο σφάλμα) από την οποία διέρχονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης των επόμενων λειτουργιών και κατ' επέκταση την αυξημένη έκλυση θερμότητας. Ο διεθνής κανονισμός IEC 60865-1 δίνει το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα I_{th} και την ισοδύναμη χρονική διάρκεια t_k πολλαπλών βραχυκυκλωμάτων με μικρή χρονική απόσταση σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 t_{ki}} \quad (1.2.3.-7)$$

$$t_k = \sum_{i=1}^n t_{ki} \quad (1.2.3.-8)$$

Επομένως, η προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνει υπ' όψιν την αυξημένη θερμοκρασία και κατ' επέκταση την αυξημένη ωμική αντίσταση των αγωγών εξ αιτίας του i -οστού βραχυκυκλώματος.

1.3. Μοντελοποίηση εναέριων και υπόγειων γραμμών

1.3.1. Πίνακας αντιστάσεων σειράς

Ο πίνακας αντιστάσεων σειράς σε δίκτυο n -αγωγών ανάμεσα σε δυο κόμβους είναι διαστάσεως $n+1 \times n+1$. Παραδείγματος χάριν, ο πίνακας αντιστάσεων σε δίκτυο 4-αγωγών (3 αγωγοί φάσεως και ουδέτερος) ανάμεσα σε δυο κόμβους είναι διαστάσεως 5×5 και μπορεί να παρασταθεί ως:

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{an} & \bar{z}_{ag} \\ \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{bn} & \bar{z}_{bg} \\ \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{cc} & \bar{z}_{cn} & \bar{z}_{cg} \\ \bar{z}_{an} & \bar{z}_{bn} & \bar{z}_{cn} & \bar{z}_{nn} & \bar{z}_{ng} \\ \bar{z}_{ag} & \bar{z}_{bg} & \bar{z}_{cg} & \bar{z}_{ng} & \bar{z}_{gg} \end{bmatrix} \quad (1.3.1.-1)$$

Οι αντιστάσεις των αγωγών φάσεων και ουδετέρου προκύπτουν από την ανάλυση των εξισώσεων του Carson [28] από το [29] για τις πρωτογενείς αντιστάσεις, σύμφωνα με τις κάτωθι σχέσεις:

Πρωτογενείς ίδιες αντιστάσεις

$$\bar{z}_{aa} = r_a + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sa}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-2)$$

$$\bar{z}_{bb} = r_b + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sb}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-3)$$

$$\bar{z}_{cc} = r_c + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sc}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-4)$$

$$\bar{z}_{nn} = r_n + j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{sn}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-5)$$

Πρωτογενείς αμοιβαίες αντιστάσεις

$$\bar{z}_{ab} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{ab}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-6)$$

$$\bar{z}_{bc} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{bc}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-7)$$

$$\bar{z}_{ca} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{ca}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-8)$$

$$\bar{z}_{in} = j\omega k \left(\ln \frac{2s}{D_{in}} - 1 \right) \quad (1.3.1.-9)$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα, k μια σταθερά ίση προς 2×10^{-7} , s το μήκος των αγωγών, D_{si} η γεωμετρική μέση ακτίνα του αγωγού (GMR), και D_{ij} η απόσταση μεταξύ των αγωγών. Η γεωμετρική μέση ακτίνα ενός αγωγού δίνεται από τον κατασκευαστή (συνήθως σε πόδια), και επομένως για την χρήση των ανωτέρω εξισώσεων απαιτείται προσοχή στην συμφωνία των μονάδων.

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό του πίνακα αντιστάσεων σειράς συγκεντρικών και θωρακισμένων καλωδίων [30, 31].

Η αντίσταση του ισοδύναμου αγωγού γης υπολογίζεται ως ακολούθως [32]:

$$\bar{z}_{gg} = \pi^2 10^{-4} f - j0,0386 \times 8\pi \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln \frac{2}{5,6198 \times 10^{-3}} \quad \Omega/\text{km} \quad (1.3.1.-10)$$

$$\bar{z}_{ig} = j2\pi \times 10^{-4} f \times \ln \frac{h_i}{\sqrt{\frac{\rho}{f}}} \quad \Omega/\text{km} \quad (1.3.1.-11)$$

όπου h_i η απόσταση του i -οστού αγωγού από το έδαφος, και ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους. Ας σημειωθεί πως για τον υπολογισμό των αντιστάσεων του δρόμου επιστροφής μέσω γης στην περίπτωση υπογείων καλωδίων, απαιτείται η αριθμητική ολοκλήρωση των Pollaczek ολοκληρωμάτων [33, 34]. Ακόμα, ας σημειωθεί ότι από την ανωτέρω ανάλυση μπορούν να προκύψουν οι αντιστάσεις θετικής, αρνητικής, και μηδενικής ακολουθίας [35].

1.3.2. Πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων

Η μοντελοποίηση των εγκάρσιων χωρητικοτήτων μπορεί να αμεληθεί σε γραμμές μεταφοράς και διανομής μικρού μήκους, ωστόσο, στην περίπτωση ασύμμετρα φορτισμένων γραμμών διανομής, και ιδιαίτερα υπογείων, συνιστάται [29].

Η βασική σχέση μεταξύ του φορτίου στους αγωγούς και την πτώση τάσης είτε από αγωγό προς το έδαφος, είτε από αγωγό προς αγωγό, είναι [30]:

$$Q_i = C_{ig} V_{ig} \quad (1.3.2.-1)$$

όπου Q_i το φορτίο επί του αγωγού, C_{ig} χωρητικότητα μεταξύ αγωγού και εδάφους, και V_{ig} η τάση μεταξύ αγωγού και εδάφους. Έστω για τον πίνακα $[C]$ των χωρητικοτήτων, ο $[P]$ είναι αντίστροφος του. Τα στοιχεία του $[P]$ για εναέριες γραμμές μπορούν να υπολογιστούν ως εξής [30, 36]:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{S_{ii}}{D_i} \quad (1.3.2.-2)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \quad (1.3.2.-3)$$

όπου S_{ii} η απόσταση του αγωγού από το είδωλο του, S_{ij} η απόσταση του αγωγού i από το είδωλο του αγωγού j , D_i η ακτίνα του αγωγού, και ϵ_o η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Τελικώς, ο πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων $[y]$ δίνεται ως:

$$[y] = j\omega[P]^{-1}$$

Οι σχέσεις για τους διάφορους τύπους καλωδίων μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία [30].

1.3.3. Ακριβής αναπαράσταση τμήματος γραμμής μεταφοράς ή διανομής

α) Ελαχιστοποίηση Kron

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο πίνακας πρωτογενών αντιστάσεων και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί σε ένα 3×3 πίνακα (στην περίπτωση τριφασικής γραμμής). Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω της ελαχιστοποίησης κατά Kron. Οι αρχικοί πίνακες μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

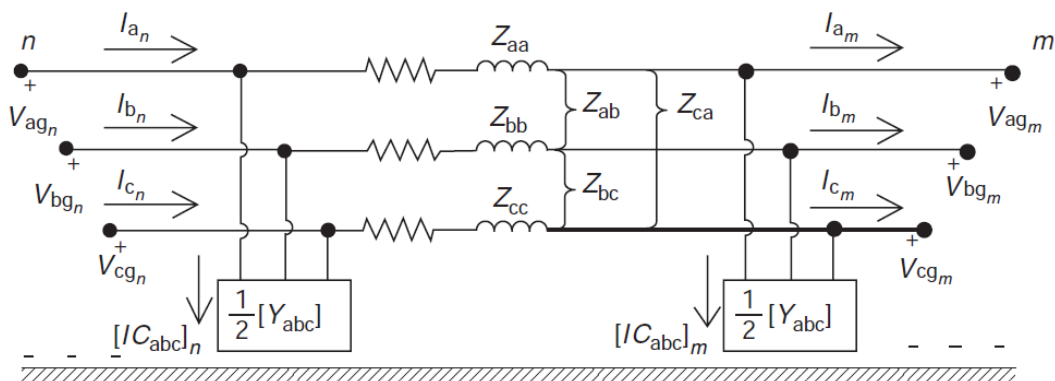
$$z = \begin{bmatrix} [z_{ij}] & [z_{in}] \\ [z_{nj}] & [z_{nm}] \end{bmatrix} \quad (1.3.3.-1)$$

όπου z_{ij} ο υποπίνακας ο οποίος περιέχει τις σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεως, z_{in} και z_{nj} οι υποπίνακες οι οποίοι περιέχουν τις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεως και ουδετέρου, και z_{nm} ο υποπίνακας ο οποίος περιέχει τις σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των ουδετέρων. Ας σημειωθεί ότι για την εφαρμογή της ελαχιστοποίησης κατά Kron απαιτείται η ενσωμάτωση της επίδρασης της γης στις πρωτογενείς αντιστάσεις. Η ελαχιστοποίηση γίνεται με εφαρμογή της σχέσης:

$$z_{abc} = [z_{ij}] - [z_{in}][z_{nm}]^{-1}[z_{nj}] \quad (1.3.3.-2)$$

β) Αναπαράσταση τμήματος γραμμής

Τελικώς, για τον σχηματισμό της ακριβούς αναπαράστασης τμήματος γραμμής, ο πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων διαιρείται σε δυο ίσα μέρη, και οι χωρητικότητες μοιράζονται στα δυο άκρα του τμήματος της γραμμής. Η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς είναι συγκεντρωμένη στο μέσο του κυκλώματος. Στο σχήμα 1.3.3.-1 φαίνεται η αναπαράσταση ενός τμήματος μιας γραμμής διανομής μέσης τάσης (τρεις αγωγοί - χωρίς ουδέτερο).



Σχήμα 1.3.3.-1: Ακριβής αναπαράσταση ενός τμήματος μιας γραμμής διανομής [30].

V_{ig_j} : Τάση της φάσης i προς γη στον κόμβο j

Z_{ij} : Σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των αγωγών

I_{i_j} : Ένταση της φάσης i εξερχόμενη από τον κόμβο j

Y_{abc} : Πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων

1.4. Διηλεκτρικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής

1.4.1. Διηλεκτρικά φαινόμενα στύλων διανομής

Οι ξύλινοι στύλοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάρτηση των εναερίων δικτύων μέσης τάσης. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος τους και στην ευκολότερη συγκριτικά μεταφορά τους σε δυσπρόσιτα μέρη. Αξίζει να σημειωθεί πως η συνεχής ηλεκτροδότηση των καταναλωτών είναι στενά συνδεδεμένη με την αξιοπιστία του δικτύου διανομής μέσης τάσης εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους του [6]. Χαρακτηριστικά, το μήκος μιας γραμμής μπορεί να φτάσει τα 100 km.

Οι τραβέρσες που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τους ξύλινους στύλους είναι ξύλινες, σιδερένιες, ή fiberglass. Οι ξύλινες τραβέρσες εμφανίζουν καλύτερη διηλεκτρική συμπεριφορά αυξάνοντας την τάση υπερπήδησης ως δευτερεύον σύστημα μόνωσης [9]. Ωστόσο, το ξύλο όταν βραχεί χάνει την μονωτική ικανότητα του (υψηλή υγρασία moisture content), και σε συνδυασμό με ρυπαθέντα μονωτήρα (υπό συνθήκες υψηλής υγρασίας ή βροχής) επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών ρευμάτων διαρροής. Το ρεύμα διαρροής μπορεί να φτάσει τις δεκάδες mA [37-39]. Η ροή μεγάλων ρευμάτων διαρροής από την τραβέρσα και στην συνέχεια από τον στύλο οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και απανθράκωση του ξύλου [40]. Η απανθράκωση αυτή μειώνει σημαντικά την μηχανική αντοχή της τραβέρσας και μπορεί να οδηγήσει σε κόψιμο της. Επιπλέον, η ύπαρξη διακένου αέρος ανάμεσα στην διεπιφάνεια ξύλου και σιδήρου (στην σύνδεση τραβέρσας και στύλου ή τραβέρσας και αντηρίδας) οδηγεί σε μεγάλες διαφορές δυναμικού και στην συνέχεια σε τόξα τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε ανάφλεξη [41].

Οι σιδερένιες τραβέρσες χρησιμοποιούνται για την αυξημένη μηχανική αντοχή που προσφέρουν. Αντιθέτως, οι ξύλινες τραβέρσες χάνουν σημαντικό μέρος της μηχανικής αντοχής τους με την πάροδο του χρόνου [10, 11]. Επιπλέον, οι μεταλλικές τραβέρσες επιτείνουν το πρόβλημα της φωτιάς στο κοχλία σύνδεσης στύλου-τραβέρσας [42].

Οι Filter και Mintz [43] αναπαράστησαν τον ξύλινο στύλο ως ένα resistive ladder network από το οποίο προσδιορίζεται η αντίσταση του στύλου και η κατανομή της τάσεως κατά μήκος του στύλου. Το μοντέλο αυτό μπορεί να λάβει υπ' όψιν την

διαφορετική υγρασία κατά μήκος του στύλου. Οι Wong και Rahmat [44, 45] τροποποίησαν το μοντέλο ώστε να προσομοιώνει τον συνδυασμό του στύλου και της τραβέρσας.

Η ειδική αντίσταση του ξύλου (φλοιού και καρδιάς) συναρτήσει της επεξεργασίας και της περιεχόμενης υγρασίας $M.C.$ (moisture content) δίνεται ως εξής [43]:

$$\rho_{CCA} = 10^{(-0.25(\%M.C.)+9.12)} \Omega m \quad (1.4.1-1)$$

$$\rho_{ακατέργαστου} = 10^{(-0.137(\%M.C.)+7.27)} \Omega m \quad (1.4.1-2)$$

$$\rho_{penta} = 10^{(-0.135(\%M.C.)+7.36)} \Omega m \quad (1.4.1-3)$$

όπου C.C.A. είναι επεξεργασία με χρωμιούχο αρσενικό του χαλκού (Chromated Copper Arsenate), και penta είναι επεξεργασία με πενταχλωροφενόλη.

Η ειδική αντίσταση και η γεωμετρία καθορίζουν την αντίσταση του ξύλου καθ' ύψος. Η αντίσταση του ξύλου σε ροή ρεύματος κάθετα είναι προσυζητημένη κατά ένα παράγοντα 1.83 [46]. Η περιεχόμενη υγρασία του φλοιού στην μέση του στύλου M είναι 11.7 % για ξηρό καιρό και 22.7 % για καιρό με αυξημένη υγρασία. Με βάση την περιεχόμενη υγρασία αυτή, η υγρασία του υπόλοιπου στύλου δίνεται από τον πίνακα 1.4.1-1 [43]. Το μέγιστο επίπεδο υγρασίας είναι 30 %. Τέλος, η περιεχόμενη υγρασία της τραβέρσας είναι ίση προς M .

Ύψος	Φλοιός	Καρδιά
Υψηλότερο 1.5 m	M	$M+5$
Μέση +τραβέρσα	M	$M+9$
0.75-1.5 m	$M+5$	0.5 $M+19.5$
0-0.75 m	$M+5$	30

Πίνακας 1.4.1-1: Περιεχόμενη υγρασία συναρτήσει του ύψους.

M : Η περιεχόμενη υγρασία στην μέση του στύλου

1.4.2. Στεμματοειδείς εκκενώσεις (φαινόμενο Corona)

Η εμφάνιση ιονισμού σε ομογενή πεδία οδηγεί στις περισσότερες των περιπτώσεων σε διάσπαση του διακένου. Ωστόσο σε μη ομογενή πεδία, φωτεινές και

ακουστικές εκκενώσεις προηγούνται της ολικής διάσπασης. Οι εκκενώσεις αυτές μπορούν να είναι μεταβατικές ή μονίμου καταστάσεως, και ονομάζονται φαινόμενα Corona (όταν εμφανίζονται πέριξ αγωγών ονομάζονται στεμματοειδείς εκκενώσεις). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί σημαντικές απώλειες ενέργειας σε γραμμές μεταφοράς, καθώς και γήρανση μονώσεων από την συνδυασμένη δράση των προσπιπτόντων ιόντων και των χημικών ενώσεων που δημιουργούνται από τις εκκενώσεις.

Η απαιτούμενη πεδιακή ένταση E_c για την εμφάνιση στεμματοειδών εκκενώσεων στην επιφάνεια εναέριων αγωγών δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση του Peek [47]:

$$E_c = m_1 m_2 E_o \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1.4.2.-1)$$

όπου m_1 ένας συντελεστής ανάλογος της κατάστασης των αγωγών (τραχύτητα της επιφανείας), m_2 ένας συντελεστής ανάλογος της επικρατούσας σχετικής υγρασίας (ίσως με μονάδα για ξηρασία), E_o μια σταθερά (ίση προς 30 kV/cm [2]), K μια σταθερά ίση προς 0,3, r η ακτίνα του αγωγού σε εκατοστά, και δ η σχετική πυκνότητα αέρα η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\delta = \frac{p}{p_o} \frac{T_o}{T} \quad (1.4.2.-2)$$

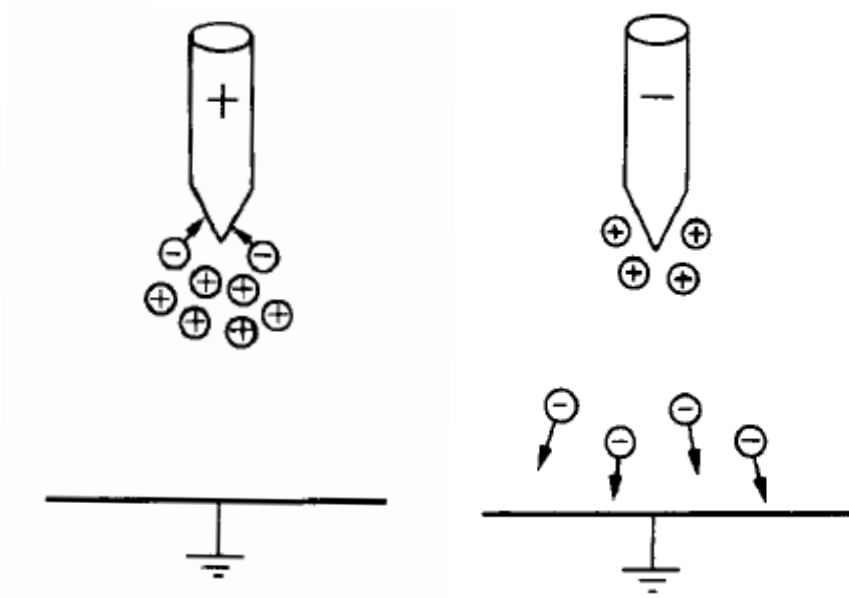
όπου p_o η ατμοσφαιρική πίεση στις κανονικές συνθήκες, T_o η θερμοκρασία στις κανονικές συνθήκες (ίση προς 293 °K), p και T η ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία για τις οποίες υπολογίζεται η απαιτούμενη πεδιακή ένταση. Επιπλέον αναλυτικές σχέσεις που επιτυγχάνουν καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα έχουν αναπτυχθεί, όπως [48]:

$$\left(\frac{E_c}{\delta} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_c}{\delta} \right) E_o \ln \left(\frac{1}{E_o} \frac{E_c}{\delta} \right) - E_o^2 = \frac{K/C}{\delta r} \quad (1.4.2.-3)$$

όπου K/C μια σταθερά ίση προς 42 (kV/cm)².

Η εμφάνιση των στεμματοειδών εκκενώσεων διαφέρει αναλόγως της πολικότητας της τάσεως. Όταν ο αγωγός βρίσκεται υπό θετική τάση, οι στεμματοειδείς εκκενώσεις

εμφανίζονται με την μορφή μιας λευκής-μπλε θήκης καλύπτουσας όλη την επιφάνεια του αγωγού. Όταν ο αγωγός βρίσκεται υπό αρνητική τάση, οι στεμματοειδείς εκκενώσεις εμφανίζονται ως κόκκινα φωτεινά σημεία μοιρασμένα στην επιφάνεια του αγωγού. Η εμφάνιση των στεμματοειδών εκκενώσεων, όταν ο αγωγός βρίσκεται υπό εναλλασσόμενη τάση, είναι παρόμοια της εμφάνισης υπό συνεχή τάση.



Σχήμα 1.4.2.-1: Κατανομή χωρικού φορτίου κατά την εκδήλωση του φαινομένου Corona [49]

Ακολουθώς, περιγράφεται η επίδραση της πολικότητας και του χωρικού φορτίου στην τάση διάσπασης. Στην περίπτωση θετικού ηλεκτροδίου (βλ. σχήμα 1.4.2.-1), τα ηλεκτρόνια εξαιτίας της μεγαλύτερης ταχύτητας τους έλκονται από την άνοδο, αφήνοντας πίσω τα θετικά ιόντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πεδιακής έντασης κοντά στο ηλεκτρόδιο και την αύξησή της πιο μακριά. Στην περίπτωση αρνητικού ηλεκτροδίου, τα ηλεκτρόνια απωθούνται στην περιοχή χαμηλής πεδιακής έντασης, και στην περίπτωση ηλεκτραρνητικών αερίων απορροφώνται από τα μόρια του αερίου και τελικώς παγιδεύουν τα θετικά ιόντα ανάμεσα στο αρνητικό χωρικό φορτίο και την ακίδα. Συνεπώς, η ένταση του πεδίου κοντά στην ακίδα αυξάνεται σημαντικά, ωστόσο η περιοχή ιονισμού μειώνεται δραστικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον τερματισμό του ιονισμού. Τελικώς, η αρνητική τάση διάσπασης είναι υψηλότερη από την θετική τάση διάσπασης.

Σημαντική έρευνα γίνεται για τον ακριβή προσδιορισμό του χωρικού φορτίου γύρω από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC), μέσω υπολογιστικών μοντέλων [50-53]. Ακόμα, προσπάθειες γίνονται για την προσομοίωση των εκκενώσεων σε πραγματικό χρόνο [54].

1.4.3. Μερικές εκκενώσεις επί μονωτήρων

Οι μερικές εκκενώσεις παρουσιάζονται αρχικά επί των μονωτήρων λόγω ξένων επικαθίσεων. Οι εκκενώσεις αυτές εξελίσσονται ενίοτε (λόγω πάρα πολύ μεγάλου ποσοστού ρύπων και υγρασίας) και σε έρπουσες διαρροές επί των μονωτήρων, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή διάσπαση ή υπερπήδηση, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τάσης από το μέσο προστασίας της γραμμής (από τις ασφάλειες ή από τον διακόπτη προστασίας της γραμμής). Οι μερικές εκκενώσεις και η εξέλιξή τους σε έρπουσες εκκενώσεις επί των μονωτήρων οφείλονται κατά κανόνα σε ταυτόχρονη επίδραση υγρασίας της ατμόσφαιρας (που επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων υπό μορφή δρόσου) και ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων από καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, κ.λ.π.. Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις έρπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης. Για το λόγο αυτό, τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται ενίοτε κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριο και Νοέμβριο), όταν υπάρχει παρατεταμένη ανομβρία (πριν η πρώτη βροχή πλύνει τους μονωτήρες) και έντονη υγρασία κατά τις πρώτες μεταμεσονύκτιες και πρωινές ώρες της ημέρας, σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων. Αυτό συμβαίνει σε γραμμές παραθαλάσσιες, ή σε γραμμές που βρίσκονται πολύ κοντά σε ρυπογόνες βιομηχανίες, όπου στη μεν πρώτη περίπτωση είναι ενδεχόμενο να υπάρχουν καθαλατώσεις, στη δε δεύτερη έντονη βιομηχανική ρύπανση στους μονωτήρες [1]. Ας σημειωθεί ότι έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί καθώς και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV, που προήλθαν από περιττώματα πουλιών στους μονωτήρες, διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι [55].

Σημαντική έρευνα διεξάγεται για την τάση υπερπήδησης, καθώς και για τον χαρακτηρισμό, ανάλυση, και πρόβλεψη του ρεύματος διαρροής των μονωτήρων υπό διάφορες συνθήκες [38, 56-59]. Τελευταία, ως αποτελεσματική λύση για την μείωση

των ρευμάτων διαρροής, χρησιμοποιούνται συνθετικοί μονωτήρες. Οι συνθετικοί μονωτήρες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των κεραμικών, όπως το πολύ ελαφρύ βάρος, υδροφοβικές ιδιότητες, αντιρρυπαντική συμπεριφορά, και χαμηλό κόστος [60-62]. Στα κύρια μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται η άγνωστη διάρκεια ζωής και η δυσκολία στην ανίχνευση των σφαλμάτων που παρουσιάζουν [63]. Πολλές εργασίες έχουν ασχοληθεί με την γήρανση των συνθετικών μονωτήρων [63-68].

Όπου τοποθετούνται νέοι μονωτήρες προτιμώνται κυρίως οι συνθετικοί. Όμως η αντικατάσταση των υπαρχόντων μονωτήρων τις περισσότερες φορές δεν είναι πρακτική ούτε και συμφέρουσα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις και ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με μεγάλη μόλυνση ή πολύ κοντά στη θάλασσα, όπου η συντήρηση των μονωτήρων με πλύσιμο απαιτείται να γίνεται συχνά, ως πρακτική για την βελτίωση της αντιρρυπαντικής συμπεριφοράς των κεραμικών μονωτήρων χρησιμοποιείται η επάλειψη με room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber [69-71].

Σε αυτό το σημείο αξιωματικά σημειωθεί ότι ο καθορισμός του μήκους ερπυσμού ενός μονωτήρα γίνεται με βάση την τεχνική οδηγία IEC 60815 [72]. Ακόμα, η επιλογή του επιπέδου μονώσεως σε κεραμικές υπερτάσεις, υπερτάσεις χειρισμού, και σε υγρή κατάσταση γίνεται με βάση το πρότυπο IEC 60071 [73].

Συνοπτικά, η τεχνική οδηγία IEC 60815 κατατάσσει τις περιοχές αναλόγως της ρύπανσης σε 5 κατηγορίες (βλ. πίνακα 1.4.3.-1). Στην συνέχεια, αναλόγως της κατηγορίας προτείνεται κατάλληλο μήκος ερπυσμού ($\text{mm}/\text{kV}_{\text{pg}}$ ή $\text{mm}/\text{kV}_{\text{pp}}$ αν ο μονωτήρας καταπονείται από πολική ή φασική τάση αντιστοίχως -βλ. πίνακα 1.4.3.-2).

Δυο χαρακτηριστικά μεγέθη για την κατηγοριοποίηση του επιπέδου ρύπανσης ενός μονωτήρα είναι η ισοδύναμη πυκνότητα αλάτων (equivalent salt deposit density ESDD) και η πυκνότητα μη διαλυτών επικαθίσεων (non soluble deposit density NSDD).

Περιγραφή του περιβάλλοντος της περιοχής

Πολύ ελαφριά	<p>Απόσταση >50 km από θάλασσα, έρημο, ή ξηρή γη</p> <p>Απόσταση >10 km από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης, ή κοντύτερα αλλά:</p> <ul style="list-style-type: none">• η κύρια διεύθυνση του ανέμου δεν περνάει από τις πηγές αυτές• υπόκειται σε μηνιαίο πλύσιμο
Ελαφριά	<p>10-50 km από θάλασσα, έρημο, ή ξηρή γη</p> <p>5-10 km από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης, ή κοντύτερα αλλά:</p> <ul style="list-style-type: none">• η κύρια διεύθυνση του ανέμου δεν περνάει από τις πηγές αυτές• υπόκειται σε μηνιαίο πλύσιμο
Μέση	<p>3-10 km από θάλασσα, έρημο, ή ξηρή γη</p> <p>1-5 km από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης, ή κοντύτερα αλλά:</p> <ul style="list-style-type: none">• η κύρια διεύθυνση του ανέμου δεν περνάει από τις πηγές αυτές• υπόκειται σε μηνιαίο πλύσιμο <p>ή μακρύτερα, αλλά:</p> <ul style="list-style-type: none">• έντονη ομίχλη ή ελαφρά βροχή εμφανίζεται συχνά μετά από μια μακρά περίοδο συσσώρευσης ρύπανσης• εμφανίζονται έντονες βροχές με μεγάλη αγωγιμότητα• υπάρχει μεγάλο επίπεδο NSDD, τυπικά μεγαλύτερο κατά 5 έως 10 φορές από το ESDD επίπεδο
Βαριά	<p>Απόσταση μικρότερη των 3 km από θάλασσα, έρημο, ή ξηρή γη</p> <p>Απόσταση μικρότερη του 1 km από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης, ή μακρύτερα αλλά:</p> <ul style="list-style-type: none">• έντονη ομίχλη ή ελαφρά βροχή εμφανίζεται συχνά μετά από μια μακρά περίοδο συσσώρευσης ρύπανσης• υπάρχει μεγάλο επίπεδο NSDD, τυπικά μεγαλύτερο κατά 5 έως 10 φορές από το ESDD επίπεδο
Πολύ βαριά	<p>Ίδιες αποστάσεις όπως για την κατηγορία "βαριά" και:</p> <ul style="list-style-type: none">• ευθέως εκτεθειμένη σε ψεκασμό από θάλασσα, ή πυκνή ομίχλη• ευθέως εκτεθειμένη σε ρύπανση με μεγάλη αγωγιμότητα, ή σκόνη με μεγάλη πυκνότητα και συχνό βρέξιμο από ομίχλη ή ελαφρά βροχή• περιοχές ερήμου με γρήγορη συσσώρευση αλάτων, και άμμου και κανονικά επίπεδα συμπυκνώσεως• περιοχές με ακραία επίπεδα NSDD, περισσότερο από 10 φορές μεγαλύτερα του ESDD επιπέδου

Πίνακας 1.4.3.-1: Κατάταξη επιπέδου ρύπανσης αναλόγως του περιβάλλοντος της περιοχής [72]

Κατηγορία	ESDD (mg/cm ²)	Επιφανειακή αγωγιμότητα (μS)	Ειδικό μήκος ερπυσμού (mm/kV _{pp})	Ειδικό μήκος ερπυσμού (mm/kV _{pg})
Ελαφριά	0,03-0,06	15-20	16	28
Μέση	0,10-0,20	24-25	20	35
Βαριά	0,30-0,60	>36	25	43
Πολύ βαριά	>0,60		31	54

Πίνακας 1.4.3.-2: Προτεινόμενο μήκος ερπυσμού αναλόγως επιπέδου ρυπάνσεως
[72]

2. Μέθοδος προστασίας από πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού δικτύου διανομής

2.1. Η επιλογή των ασφαλειών στους πίνακες χαμηλής τάσης των υποσταθμών διανομής

Στο σχήμα 2.1.-1 δίνεται απλοποιημένα το πολυγραμμικό σχέδιο ενός υποσταθμού διανομής χαμηλής τάσης στην Ελλάδα. Πρόκειται για έναν μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία τριγώνου-γειωμένου αστέρα (δίκτυο TN), έναν πίνακα εξωτερικού χώρου με μία τριφασική είσοδο μέσω μονοπολικών αποζευκτών και πέντε τριφασικές αναχωρήσεις, από όπου ηλεκτροδοτούνται πέντε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης προς τους διάφορους καταναλωτές. Προκειμένου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, να λειτουργήσει αποτελεσματικά η προστασία της γραμμής χαμηλής τάσης, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη [3, 74]:

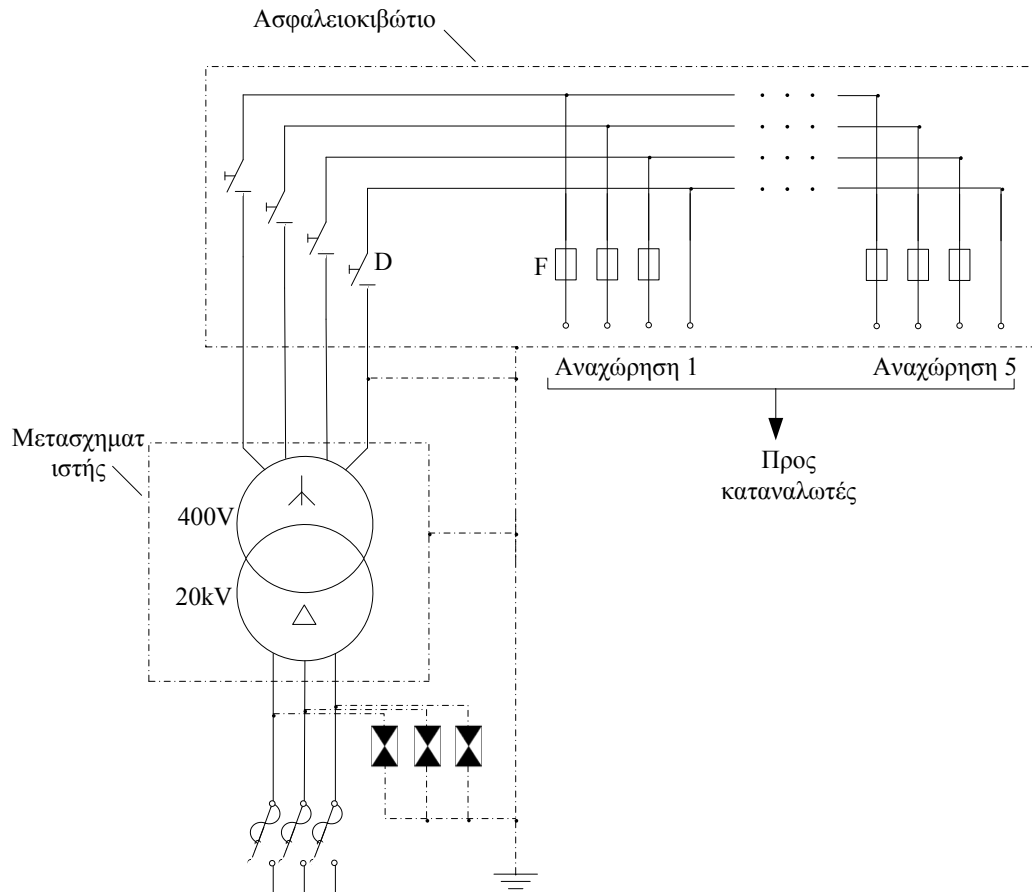
$$I_{SC} \geq 3I_F \quad (2.1.-1)$$

όπου I_{SC} το ρεύμα βραχυκύκλωσης και I_F το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας της γραμμής. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται συνθήκη βραχυκύκλωσης ή και συνθήκη ουδετέρωσης, διότι είναι απαραίτητο να ισχύει προκειμένου να εφαρμοστεί η γείωση του ουδετέρου σαν μέθοδος προστασίας έναντι τάσεων επαφής.

Αν θεωρηθεί ότι συνέβη σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης μονοφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου στον αέρα (ή στο έδαφος) σε μήκος αγωγού (απόσταση) d από τον μετασχηματιστή διανομής, τότε η συνολική αντίσταση Z του κυκλώματος θα είναι:

$$Z = \sqrt{(R_T + R_L)^2 + (X_T + X_L)^2} \quad (2.1.-2)$$

όπου R_T η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή, X_T η επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή, R_L η ωμική αντίσταση του αγωγού και X_L η επαγωγική αντίσταση του αγωγού μέχρι την θέση βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 2.1.-1: Απλοποιημένο πολυγραμμικό σχέδιο ενός υποσταθμού διανομής χαμηλής τάσης

D: Μονοπολικός αποζεύκτης (500 V, 800 A)

F: Ασφάλεια (500 V, ονομαστικού ρεύματος αναλόγως των αναγκών κατανάλωσης)

Αντικαθιστώντας το I_{SC} με:

$$I_{SC} = \frac{U}{Z} \quad (2.1.-3)$$

και λύνοντας την ανίσωση (2.1.-3) ως προς Z (αντικαθιστώντας τις ωμικές αντιστάσεις R_L και επαγωγικές X_L με τις αντίστοιχες ωμικές r_L και επαγωγικές x_L αντιστάσεις ανά μονάδα μήκους αγωγού), προκύπτει:

$$\frac{U}{3I_F} \geq \sqrt{(R_T + r_L l)^2 + (X_T + x_L l)^2} \quad (2.1.-4)$$

ή

$$l^2 + 2l \frac{R_T r_L + X_T x_L}{r_L^2 + x_L^2} - \left(\frac{U}{3I_F Z} \right)^2 + \frac{Z_T^2}{Z_L^2} \leq 0 \quad (2.1.-5)$$

Η ανισότητα (5) δίνει σαν μέγιστη τιμή L για το l την ακόλουθη:

$$L = -\frac{R_T r_L + X_T x_L}{Z^2} + \sqrt{\left(\frac{U}{3I_F Z} \right)^2 - \frac{r_L X_T + x_L R_T}{Z^2}} \quad (2.1.-6)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για τις αντίστοιχες τιμές των ωμικών (r_L) και επαγωγικών (x_L) αντιστάσεων ανά μέτρο γυμνών αγωγών χαμηλής τάσης, αλλά και των ωμικών (R_T) και επαγωγικών (X_T) αντιστάσεων των μετασχηματιστών διανομής που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, με τις αντίστοιχες ασφάλειές τους (I_F), προκύπτει ο πίνακας 2.1-1 που περιέχει τα μέγιστα μήκη (L) γραμμών χαμηλής τάσης για τα οποία ισχύει η συνθήκη (2.1.-1).

Οι τιμές των ωμικών (R_L) και επαγωγικών (X_L) αντιστάσεων των αγωγών χαμηλής τάσης, προέκυψαν από τον πίνακα 2.1.-2 [3], λαμβάνοντας όμως υπόψη κάθε φορά και την επιστροφή του ρεύματος μέσω του ουδετέρου. Δηλαδή, στις εναέριες γραμμές, χρησιμοποιήθηκαν για τα R_L και X_L αντίστοιχα, οι διπλάσιες τιμές του πίνακα 2.1.-2. Επίσης, οι τιμές R_T και X_T δίνονται στον πίνακα 2.1.-3 [3].

Όταν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για το μέγεθος του μετασχηματιστή, το μέγεθος της ασφάλειας και το μήκος της γραμμής κατά τους ανωτέρω πίνακες, τότε ισχύει η συνθήκη βραχυκύκλωσης (2.1.-6), σύμφωνα με την οποία κατά το βραχυκύκλωμα μεταξύ των αγωγών στον αέρα (ή στο έδαφος) συμβαίνει ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται οι αγωγοί μόνο μερικούς βαθμούς Κελσίου και συνεπώς να μη δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από αυτούς [3, 75]. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός, ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συνολική αντίσταση της διαδρομής βραχυκύκλωσης είναι πάντοτε το πολύ 1 Ω με αποτέλεσμα το ρεύμα βραχυκύκλωσης να έχει στην πράξη πολύ μεγαλύτερη τιμή από $3I_F$, που προκαλεί λόγω αυτού τήξη της ασφάλειας σε χρόνο μικρότερο του 1 s [23]. Η χειρότερη περίπτωση είναι όταν το ρεύμα είναι ίσο προς $3I_F$ και η ασφάλεια τήκεται σε 5 δευτερόλεπτα [74].

Μέγιστο μήκος γραμμής Χ.Τ. (m)					
S_N (kVA)	Ασφάλεια A	Ισοδύναμη διατομή Cu (mm ²)			
		16	35	50	70
50	50	571	1089		
	63	444	842	1069	
	80	339	641	811	978
75	63	463	882	1120	
	80	358	680	863	1041
	100	281	531	672	809
	125	218	411	519	624
100	63	470	899	1143	
	80	366	697	886	1070
	100	288	548	695	839
	125	226	429	543	654
	160	172	324	409	492
150- 160	80	373	714	908	1098
	100	295	565	718	867
	125	234	445	565	682
	160	179	341	432	520
	200		266	336	405
	250		206	260	312
250	100	301	578	736	890
	125	239	458	583	705
	160	185	354	450	544
	200		279	354	428
	250		219	278	335
	315			215	259
	400				197
400	125	242	466	593	718
	160	188	361	460	557
	200		287	365	441
	250		227	289	349
	315			226	272
	400				210

Πίνακας 2.1.-1: Μέγιστο μήκος των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης, ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή (50 - 400 kVA) και το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	r_L (mΩ/km)	x_L (mΩ/km)
Γυμνός αγωγός αλουμινίου 16 mm ²	1140	330
Γυμνός αγωγός αλουμινίου 35 mm ²	533	306
Γυμνός αγωγός αλουμινίου 50 mm ²	381	294
Γυμνός αγωγός αλουμινίου 70 mm ²	277	284

Πίνακας 2.1.-2: Ωμικές (r_L) και επαγωγικές αντιστάσεις (x_L) ανά km γυμνών αγωγών γραμμών χαμηλής τάσης (απόσταση μόνωσης 30 cm)
(η διατομή των αγωγών είναι ισοδύναμη χαλκού)

S_N (kVA)	25	50	75	100	150	200	250	400	630	750	1000
R_T (mΩ)	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	3,6	3,0	2,2
X_T (mΩ)	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	10,8	9,1	6,9

Πίνακας 2.1.-3: Ωμικές (R_T) και επαγωγικές αντιστάσεις (X_T) μετασχηματιστών διανομής αναλόγως της ονομαστικής ισχύος S_N

2.2. Οι πλέον πιθανές περιπτώσεις αποκοπής αγωγού

Η αποκοπή αγωγών στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης είναι μία πολύ σπάνια (αν όχι αδύνατη) περίπτωση βλάβης, γιατί οι γραμμές κατασκευάζονται και συντηρούνται έτσι, ώστε να ανταπεξέρχονται επιτυχώς σε ακραίες καταστάσεις λειτουργίας (όπως το βραχυκύκλωμα που προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2) και δυσμενέστατα καιρικά φαινόμενα (όπως χιονοπτώσεις και θυελλώδεις άνεμοι, κ.λ.π. αναλόγως της περιοχής). Μόνο θεομηνίες, που δεν έχουν συμβεί ποτέ στην περιοχή μίας γραμμής σε βάθος χρόνου (και γι' αυτό δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη στους κανονισμούς για τη μελέτη και κατασκευή των δικτύων) ενδέχεται να προκαλέσουν αποκοπή αγωγών, όπως είχε συμβεί π.χ. στη νήσο Κεφαλλήνια το 2006 με ανέμους εντάσεως 10 μποφόρ, όταν σε βάθος χρόνου 30 ετών οι πνέοντες άνεμοι ήταν, στην περιοχή πτώσεως των πυλώνων, το πολύ 7 μποφόρ [3].

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι στις γραμμές χαμηλής τάσης από γυμνούς αγωγούς αποκλείεται, λόγω των μεγάλων αποστάσεων μόνωσης μεταξύ των αγωγών (περίπου 30 cm) η εκδήλωση φαινομένων ιονισμού ή αλλιώς σπινθηρισμών (όπως συνηθίζεται να αποκαλούνται στην πράξη τα φαινόμενα αυτά, λόγω της φωτεινής ακτινοβολίας και του θορύβου που προκαλούν). Επίσης, από τον νόμο του Paaschen [3, 49, 76]

προκύπτει, ότι δεν εκδηλώνονται φαινόμενα σπινθηρισμού τόσο περί τους γυμνούς αγωγούς των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης, όσο και στους μονωτήρες στήριξης τους στους στύλους. Γι' αυτό αποκλείεται αποκοπή γυμνού αγωγού σε γραμμή χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής αποδιδόμενη σε σπινθηρισμούς.

Όμως, παρά τα ανωτέρω, υπάρχει πάντοτε μία πιθανότητα να συμβεί αποκοπή αγωγού από αίτια που δεν αντιμετωπίζονται στον κανονισμό συντήρησης των εναέριων γραμμών, όπως:

1. ο τραυματισμός των αγωγών από σκάγια κυνηγετικών όπλων, κάτι που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες (όπως π.χ. μηχανική καταπόνηση λόγω χιονόπτωσης, θερμική καταπόνηση από φωτιά πλησίον της γραμμής, κ.λ.π.), την αποκοπή αγωγού ή και αγωγών, και
2. η πτώση ενός δένδρου πάνω στη γραμμή.
3. η σύγκρουση οχήματος με στύλο, κτλ.

Κατωτέρω εξετάζεται κατά πόσον ένα σφαιρίδιο από αυτά που χρησιμοποιούνται στη γόμωση των φυσιγγίων κυνηγετικών όπλων (σκάγια), έχει την δυνατότητα να τραυματίσει ή να κόψει από μία απόσταση 35 m ένα κλώνο αλουμινίου για παράδειγμα ενός αγωγού αλουμινίου 16 mm², ο οποίος αποτελείται από 7 συνεστραμμένους κλώνους διαμέτρου $d_w = 2,21$ mm ο καθένας. Η κινητική ενέργεια ενός σφαιριδίου κατά την πρόσκρουσή του επί ενός κλώνου αλουμινίου του ανωτέρω γυμνού αγωγού δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$E_k = \frac{1}{2} mu^2 \quad (2.2.-1)$$

όπου m η μάζα του σφαιριδίου (η οποία εξαρτάται από τη διάμετρό του) και u η ταχύτητα πρόσκρουσης επί του κλώνου αλουμινίου. Για ένα σφαιρίδιο ακτίνας r_p ο όγκος του V_p είναι:

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \quad (2.2.-2)$$

Έτσι, για πυκνότητα ρ η μάζα του σφαιριδίου είναι

$$m = \rho V_p \quad (2.2.-3)$$

Από τις σχέσεις (2.2.-1), (2.2.-2) και (2.2.-3), η κινητική ενέργειά E_k του σφαιριδίου τελικά προκύπτει:

$$E_k = \frac{2}{3} \pi \rho r_p^3 u^2 \quad (2.2.-4)$$

Όμως, η ενέργεια του σφαιριδίου κατά την πρόσκρουση στον κλώνο του αγωγού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E_k = F d_s \quad (2.2.-5)$$

όπου F η μέση δύναμη που ασκείται στον κλώνο από το σφαιρίδιο, και d_s η διάμετρος του κλώνου αλουμινίου. Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι έγινε η παραδοχή, ότι κατά την πρόσκρουση δεν μετακινήθηκε ο αγωγός. Η παραδοχή αυτή είναι όμως ρεαλιστική λόγω της πολύ μεγάλης μάζας του αγωγού συγκριτικά με εκείνη του σφαιριδίου και κατά συνέπεια της μεγάλης αδράνειας του αγωγού. Από τις (2.2.-4), και (2.2.-5) προκύπτει η ασκούμενη μέση δύναμη επί του κλώνου κατά την πρόσκρουση του σφαιριδίου επί αυτού, η οποία είναι:

$$F = \frac{2}{3} \pi \rho r_p^3 u^2 / d_s \quad (2.2.-6)$$

Η ελάχιστη δύναμη F_{min} για την αποκοπή του κλώνου αλουμινίου δίνεται από την σχέση:

$$F_{min} = \sigma \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (2.2.-7)$$

όπου σ η τάση κοπής του αλουμινίου λόγω κρούσης (διάτμηση).

Η αποκοπή του κλώνου αλουμινίου επιτυγχάνεται όταν η μέση εξασκούμενη δύναμη από το σφαιρίδιο είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη δύναμη F_{min} . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανωτέρω αποκοπή του κλώνου αλουμινίου συμβαίνει όταν η δύναμη F εξασκείται κατά μήκος της διαμέτρου του. Σε διαφορετική περίπτωση

προκαλείται παραμόρφωση του κλώνου ή αφαίρεση υλικού από αυτόν αναλόγως προς τη διεύθυνση της δύναμης πρόσκρουσης.

Είδος αγωγού	$A(\text{mm}^2)$	$d_s (\text{mm})$	$F (\text{kg-f})$	$F_{\min} (\text{kg-f})$
ACSR	16	2.32	84.0	10.6
	35	3.44	56.6	23.2
	50	4.11	47.4	33.1
	70	2.33	83.6	10.6
	95	2.72	71.6	14.5
Al	16	2.21	88.2	9.6
	35	3.22	60.5	20.4
	50	2.35	82.9	10.8
	70	2.78	70.0	15.2

Πίνακας 2.2.-1: Μηχανική καταπόνηση κλώνων αλουμινίου των αγωγών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από σκάγια κυνηγετικών όπλων.

A : διατομή αγωγού (ισοδύναμη χαλκού).

d_s : διάμετρος κλώνου αλουμινίου.

F : Δύναμη πρόσκρουσης σε κλώνο αλουμινίου

F_{\min} : ελάχιστη δύναμη αποκοπής ενός κλώνου αλουμινίου.

Στον πίνακα 2.2.-1 δίνονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους αγωγούς διανομής του δικτύου στην Ελλάδα (αλουμινίου και ACSR), από όπου προκύπτει ότι σε όλους μπορεί να συμβεί αποκοπή κλώνων από σκάγια κυνηγετικών όπλων. Η ταχύτητα πρόσκρουσης επί του κλώνου αλουμινίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι περίπου 200 m/s [77]. Η διάμετρος των σφαιριδίων για το κυνήγι πουλιών είναι 2.03-2.54 mm (σκάγια Νο 7 έως Νο 9 αντίστοιχα όπως φαίνεται στον πίνακα της βιβλιογραφίας [78]) και η πυκνότητα τους $\rho=11.34 \text{ kg/dm}^3$. Η τάση κοπής του αλουμινίου σ λόγω κρούσης (διάτμηση) είναι 2.5-4 kg-f/mm².

2.3. Αποκοπή ενός αγωγού φάσης

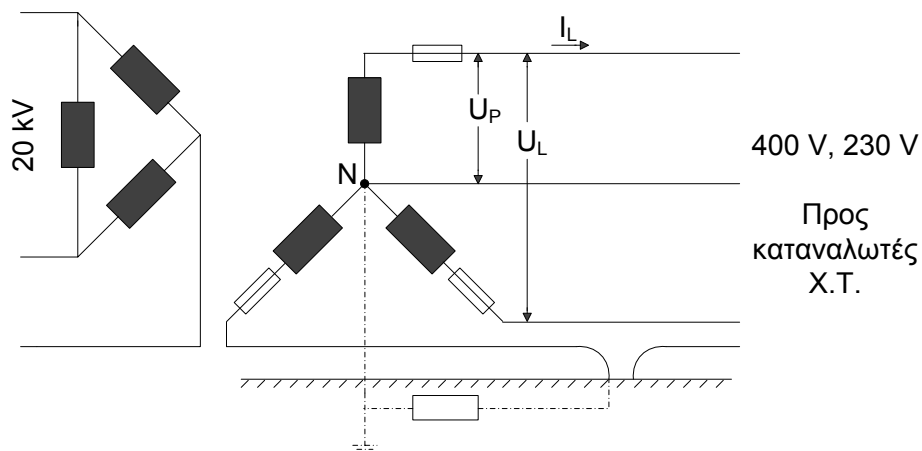
2.3.1 Υπολογισμός του ρεύματος προς γη

Στο σχήμα 2.3.1-1 δίνεται απλοποιημένα το κύκλωμα κατά την αποκοπή και πτώση ενός αγωγού φάσης στο έδαφος. Εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία το

τιμή του αγωγού που έπεσε στο έδαφος είναι προς την πλευρά του μετασχηματιστή, γιατί τότε μόνο μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος προς γη. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό η ενεργός τιμή του ρεύματος προς γη είναι:

$$I_{leak} = \frac{U_{ph}}{\sqrt{(R_T + R_L + R_C)^2 + (X_T + X_L)^2}} \quad (2.3.1.-1)$$

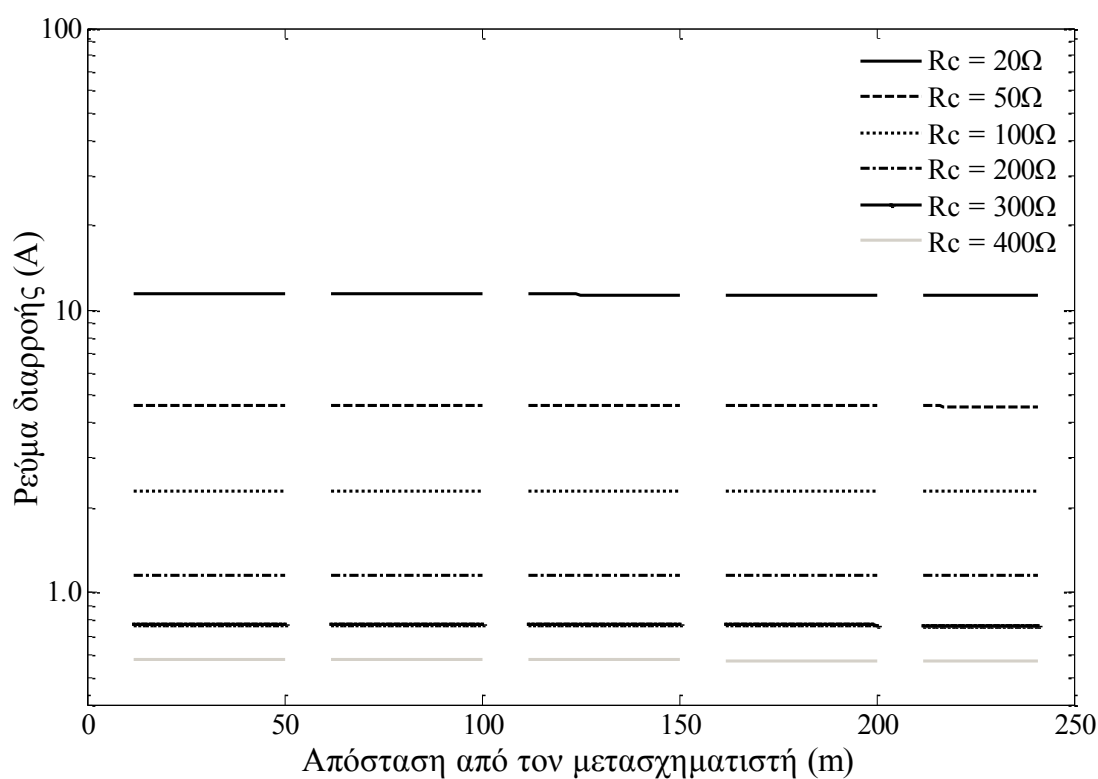
όπου U_{ph} η φασική τάση (230 V), R_L η ωμική αντίσταση του αγωγού, X_L η επαγωγική αντίσταση του αγωγού μέχρι την θέση βραχυκύκλωσης, R_T η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή, X_T η επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή, R_C η αντίσταση επαφής μεταξύ αγωγού και γης (συμπεριλαμβάνοντας την αντίσταση που συναντά το ρεύμα επιστροφής). Οι τιμές της αντίστασης που συναντώνται στην πράξη είναι 20-400 Ω και επομένως οι υπολογισμοί του ρεύματος έγιναν για $R_C = 20, 50, 100, 200, 300, 400$ Ω. Οι τιμές αυτές επελέγησαν για να αντιστοιχούν σε μία καλή μεταλλική επαφή ($R_C = 1$ Ω) μέχρι και τις μεγάλες αντιστάσεις ($R_C = 3000$ Ω) ανάλογα με το έδαφος.



Σχήμα 2.3.1-1: Αποκοπή ενός αγωγού φάσης

Σύμφωνα με τα ανωτέρω τα αποτελέσματα των υπολογισμών του ρεύματος προς γη για αγωγό ισοδύναμης διατομής χαλκού 16 mm^2 για διάφορες τιμές αντίστασης σε σχέση με το μήκος τους, για ασφάλεια γραμμής 80 A και μετασχηματιστή 100 kVA κατά τον πίνακα 2.1.-1, δίνονται στο σχήμα 2.3.1-2. Το ρεύμα διαρροής εμφανίζει ασυνέχειες καθώς για αποκοπή αγωγού στα πρώτα 10 m από κάθε στύλο ο αγωγός

δεν μπορεί να έρθει σε επαφή με την γη και επομένως το ρεύμα διαρροής είναι μηδενικό.



Σχήμα 2.3.1-2: Ρεύμα διαρροής γραμμής XT συναρτήσει της απόστασης από τον μετασχηματιστή

2.3.2. Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στην αντίσταση επαφής

Εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία το τμήμα του αγωγού που έπεσε στο έδαφος είναι προς την πλευρά του μετασχηματιστή, γιατί τότε μόνο μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος προς γη.

Ο υπολογισμός του ρεύματος προς γη λόγω πτώσης του αγωγού έγινε, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2, από την σχέση (2.3.1.-1) με συμμετοχή όλων των αντιστάσεων που συνθέτουν το κύκλωμα. Όμως, η θερμική ισχύς P_{th} επί του εδάφους, η οποία έχει σημασία για τα φαινόμενα που μπορεί να εκδηλωθούν εκεί, προέρχεται μόνο από την αντίσταση R_C . Έπεται:

$$P_{th} = I_{leak}^2 R_C \quad (2.3.2.-1)$$

Όταν επέλθει θερμική ισορροπία στον αγωγό, η εκλυόμενη θερμότητα θα αποδίδεται στο σύνολο της στο έδαφος. Επομένως:

$$P_{th} = kB\Delta T \quad (2.3.2.-2)$$

όπου k η θερμική αγωγιμότητα του αγωγού, B η επιφάνεια απαγωγής της θερμότητας, και ΔT η αύξηση θερμοκρασίας του αγωγού.

Αν θεωρηθεί ότι, λόγω του ύψους ανάρτησης της γραμμής επί του ξύλινου στύλου, το μήκος του αγωγού επί του εδάφους είναι $l_p - 10$ μέτρα (όπου l_p το μήκος της γραμμής από τον προηγούμενο στύλο μέχρι τη θέση αποκοπής, και δέκα μέτρα το ύψος του στύλου στη χαμηλή τάση), τότε η επιφάνεια B είναι:

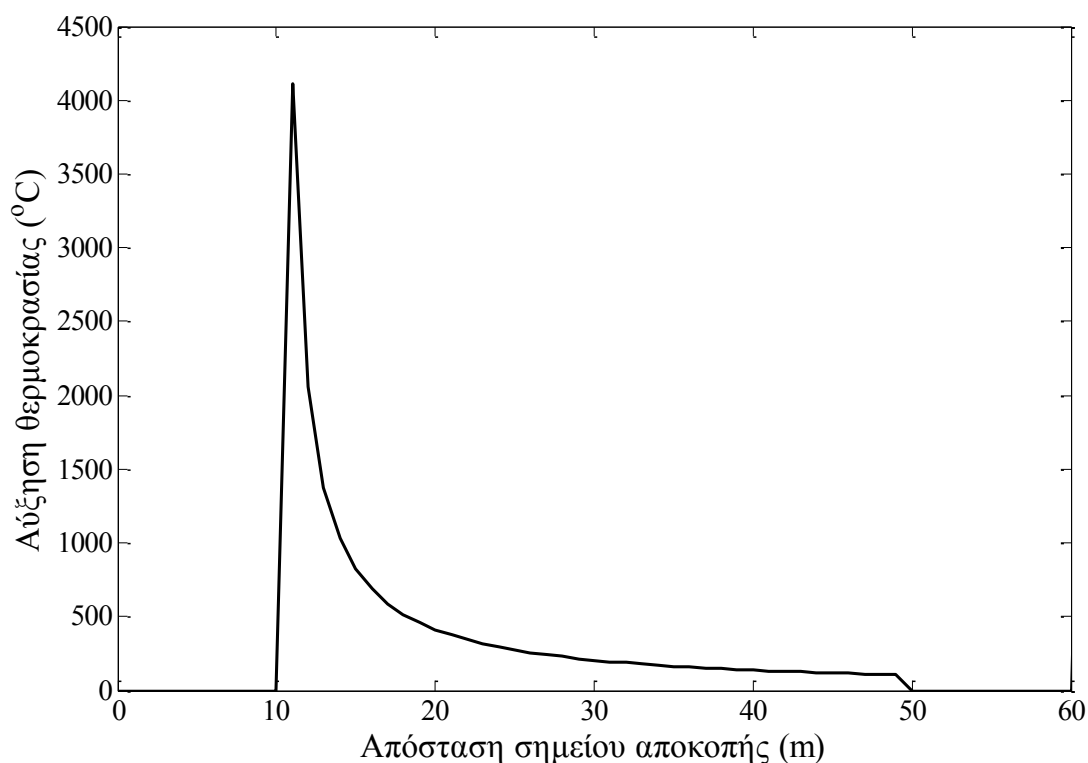
$$B \approx \pi D_C (l_p - 10) = \pi \sqrt{4A/\pi} (l_p - 10) \quad (2.3.2.-3)$$

όπου D_C η διάμετρος του αγωγού και A η διατομή του. Μέγιστη τιμή για το l_p έχουν θεωρηθεί τα 50 m που είναι η απόσταση μεταξύ δύο στύλων.

Τελικώς, από τις σχέσεις (2.3.2.-1), (2.3.2.-2), και (2.3.2.-3) προκύπτει:

$$\Delta T = \frac{I_{leak}^2 R_C}{24.8(l_p - 10)\sqrt{A}} \quad (2.3.2.-4)$$

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, τα αποτελέσματα των υπολογισμών της τιμής ΔT επί του εδάφους, λόγω αποκοπής γυμνού αγωγού αλουμινίου (ηλεκτροδοτούμενου κατά τον πίνακα 2.1.-1 μέσω ασφάλειας 80 A από μετασχηματιστή 100 kVA), διατομής ισοδύναμης χαλκού 16 mm^2 , αναλόγως του μήκους του, δίνονται στο σχήμα 2.3.2.-1. Χρησιμοποιήθηκε αντίσταση διάβασης ίση με 100 Ω.



Σχήμα 2.3.2-1: Αύξηση θερμοκρασίας από διαρροή ρεύματος συναρτήσεως της απόστασης του σημείου αποκοπής από τον ανάντη στύλο

2.4. Σχόλια

Για $R \geq 10 \Omega$ ή $R = \infty$ εάν ο αγωγός παραμένει αιωρούμενος στον αέρα, δεν προκαλείται τήξη της ασφάλειας, αφού το ρεύμα προς γη είναι μικρότερο του ονομαστικού ρεύματος των 80 A της ασφάλειας. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχει άμεσος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας για τον άνθρωπο αν έλθει σε επαφή με τον αγωγό.

Από τις χαρακτηριστικές $\Delta\theta = f(l_p)$ που προκύπτουν από την σχέση (2.3.2.-4) και τις θερμοκρασίες ανάφλεξης διαφόρων υλικών κατά τον πίνακα 2.4.-1 [79-81] φαίνεται ότι κατά την πτώση του αγωγού στο έδαφος αναπτύσσονται θερμοκρασίες στην επιφάνεια του εδάφους, που μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιά αν υπάρχει στη θέση πτώσης του αγωγού διαθέσιμη καύσιμη ύλη.

Επίσης από το σχήμα 2.3.2-1 φαίνεται ότι μεγαλύτερη θερμοκρασία αναπτύσσεται όταν μικρότερο μήκος του αγωγού ακουμπά στο έδαφος. Από τους υπολογισμούς της διαφοράς θερμοκρασίας που έχουν γίνει για τις διάφορες αντιστάσεις επαφής

φαίνεται ότι μεγάλες θερμοκρασίες αναπτύσσονται για αντιστάσεις μικρότερες των 200 Ω.

Υλικό	Θερμοκρασία ανάφλεξης σε °C
Εφημερίδα	185
Μαλλί	228 έως 264
PVC	391
Χαρτί	230
Πευκόξυλο	228 έως 264

Πίνακας 2.4.-1: Θερμοκρασία ανάφλεξης ορισμένων υλικών

Συνεπώς η αποκοπή ενός ή περισσοτέρων αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης, εγκυμονεί κινδύνους ηλεκτροπληξίας για τον άνθρωπο και παράλληλα μπορεί να αποτελέσει και αιτία πυρκαγιάς. Γι' αυτό επιβάλλεται η λήψη μέτρων, τα οποία θα πρέπει να εφαρμοστούν άμεσα για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος.

2.5. Μία προτεινόμενη μέθοδος προστασίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος κατά την αποκοπή αγωγού του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης

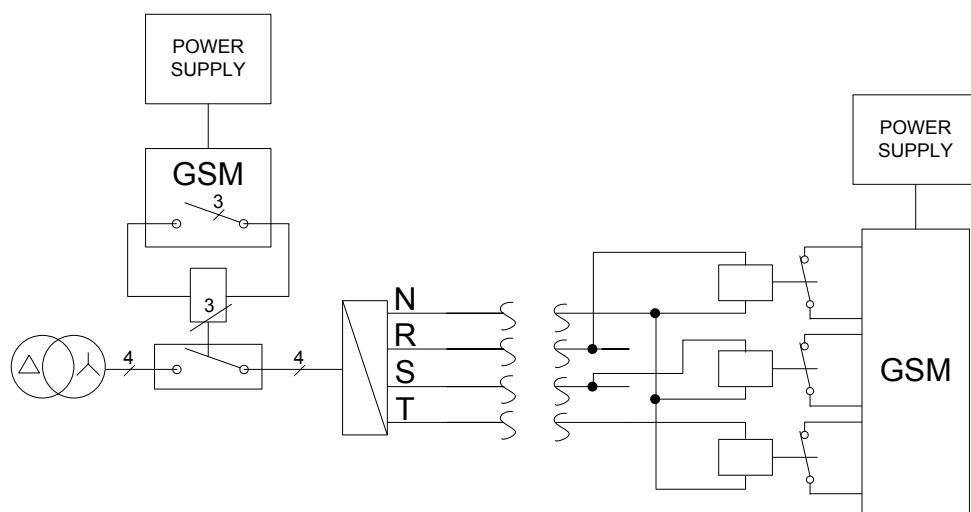
Εκ των προαναφερθέντων συμπεραίνεται ότι χρειάζεται να γίνει σχετική πρόβλεψη στους κανονισμούς, ώστε να αποκλείονται οι προαναφερθείσες δυσμενείς επιπτώσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Η προστασία μπορεί να γίνει με ένα ηλεκτρονόμο 230 V ανά φάση, που διαθέτει μία κλειστή επαφή (NC) (σχήμα 2.5.-1). Όπως φαίνεται στο σχήμα οι ηλεκτρονόμοι συνδέονται σε διαφορετική φάση ο καθένας και στον ουδέτερο. Οι συνδέσεις αυτές πρέπει να γίνουν στον τελευταίο στύλο της γραμμής. Επομένως, σε περίπτωση αποκοπής ενός αγωγού ο αντίστοιχος ηλεκτρονόμος δεν θα έχει τάση και γι' αυτό θα κλείσει η επαφή του, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση ενός συστήματος GSM, που θέτει εκτός λειτουργίας έναν αυτόματο γενικό διακόπτη παροχής τάσης προς τον πίνακα χαμηλής τάσης και ειδοποιεί τους μηχανικούς υπηρεσίας μέσω άμεσης κλήσης στο κέντρο ελέγχου. Η τοποθεσία του σφάλματος μπορεί να καθοριστεί μέσω

του αριθμού της κάρτας SIM που αντιστοιχίζεται σε κάθε σύστημα. Το σύστημα GSM τροφοδοτείται από μπαταρία επαναφορτιζόμενη από το δίκτυο. Συνεπώς, απαιτείται περιοδικός έλεγχος και αντικατάσταση της μπαταρίας.

Μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδεδεμένη στην γραμμή πρέπει να εφοδιαστεί με έναν γενικό αυτόματο διακόπτη, ο οποίος θα την αποσυνδέει όταν συμβεί αποκοπή.

Ο διακόπτης αυτός μπορεί να εγκατασταθεί σε μεταλλικό κιβώτιο συναρμολογημένο πάνω στην οροφή του πίνακα χαμηλής τάσεως ή στον στύλο. Σημειώνεται ότι συστήματα GSM είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, τα οποία βρίσκουν ήδη εφαρμογές σε άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Εννοείται ότι το σύστημα GSM, που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να παρέχει δυνατότητα απενεργοποίησής του σε περιπτώσεις αποκατάστασης βλαβών και εργασίες σύνδεσης νέων παροχών.



Σχήμα 2.5.-1: Ενεργοποίηση συστήματος GSM σε περίπτωση αποκοπής αγωγού

3. Αύξηση θερμοκρασίας από τον κύκλο λειτουργίας αυτόματων διακοπών ελαίου και διακοπών αυτόματης επαναφοράς

3.1. Μέθοδος υπολογισμού αυξήσεως θερμοκρασίας

Πολλές εργασίες έχουν δημοσιευθεί με αντικείμενο την αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών και καλωδίων του δικτύου από ρεύματα βραχυκύκλωσης [25-27]. Ωστόσο, δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς η θερμική καταπόνηση από επαναλαμβανόμενα βραχυκυκλώματα (όπως συμβαίνει κατά την λειτουργία των Αυτόματων Διακοπών Ελαίου ΑΔΕ και των Διακοπών Αυτόματης Επαναφοράς ΔΑΕ).

Όπως έχει προαναφερθεί (βλ. παρ. 1.2.3.), ο διεθνής κανονισμός IEC 60865-1 δίνει το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα I_{th} και την ισοδύναμη χρονική διάρκεια t_k πολλαπλών βραχυκυκλωμάτων με μικρή χρονική απόσταση σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 t_{ki}} \quad (3.1.-1)$$
$$t_k = \sum_{i=1}^n t_{ki}$$

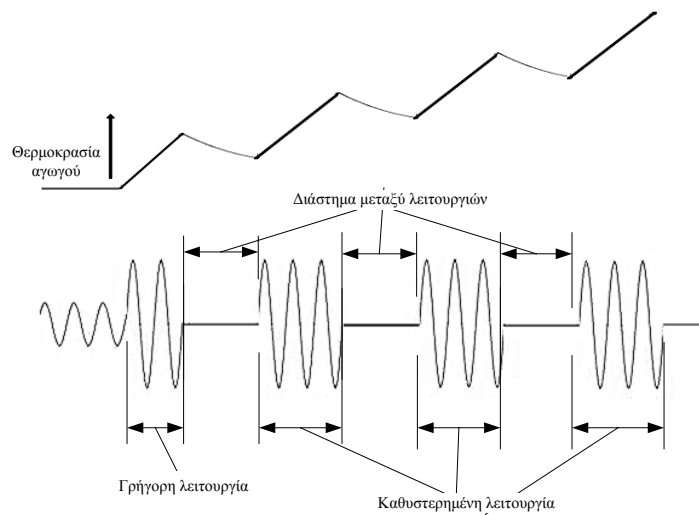
Η προσέγγιση, όμως, αυτή δεν λαμβάνει υπ' όψιν την αυξημένη θερμοκρασία και κατ' επέκταση την αυξημένη ωμική αντίσταση των αγωγών εξ' αιτίας του i -οστού βραχυκυκλώματος. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί ότι το $i+1$ ρεύμα βραχυκύκλωσης εκλύει αυξημένα ποσά θερμότητας. Το συμπέρασμα αυτό δημιουργεί την ανάγκη για μια νέα μέθοδο υπολογισμού της αύξησης θερμοκρασίας από διακοπόμενα βραχυκυκλώματα, εξ αιτίας των προαναφερθέντων διακοπών.

Η προτεινόμενη μέθοδος αντιμετωπίζει το κάθε βραχυκύκλωμα ως ένα ξεχωριστό συμβάν του οποίου οι επιπτώσεις είναι συνάρτηση των συνθηκών κατά την έναρξή του. Η αύξηση θερμοκρασίας από το i -οστό βραχυκύκλωμα εξαρτάται από την θερμοκρασία που έχουν αποκτήσει οι αγωγοί από τα προηγούμενα βραχυκυκλώματα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του κύκλου λειτουργίας ενός αυτόματου διακόπτη ελαίου ή διακόπτη αυτόματης επαναφοράς, η εφαρμογή της μεθόδου φαίνεται στο

σχήμα 3.1.-1. Η αύξηση θερμοκρασίας από την i -οστή λειτουργία του διακόπτη υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση [23]:

$$\rho_{i+1}(T) = \exp\left(\frac{S_{th,i}^2 t_{k,i} a_i \rho_i}{cd}\right) \rho_i \quad (3.1.-2)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση, T η θερμοκρασία, c η θερμοχωρητικότητα, d η πυκνότητα, a ο γραμμικός θερμοκρασιακός συντελεστής του αγωγού και S_{th} η ισοδύναμη θερμική πυκνότητα ρεύματος όπως προκύπτει από το πρότυπο IEC 60865-1.



Σχήμα 3.1.-1: Εφαρμογή της μεθόδου και θερμοκρασιακή εξέλιξη του αγωγού

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 140 °C η γραμμική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από την θερμοκρασία παύει να είναι ακριβής καθώς υποτιμά την πραγματική τιμή της [82]. Η υποτίμηση αυτή οδηγεί σε μικρότερες θερμοκρασίες των αγωγών από βραχυκυκλώματα και συνεπώς σε υπερτίμηση της ικανότητας του αγωγού να ανταπεξέρχεται στην θερμική καταπόνηση. Για αυτό το λόγο γίνεται χρήση καμπύλης τρίτης τάξης η οποία προσεγγίζει πειραματικά δεδομένα, η οποία δίνεται από την [83]:

$$\rho(T) = -0.237 + 0.00815T + 5.46 \times 10^{-6} T^2 - 1.97 \times 10^{-9} T^3 \quad (3.1.-3)$$

Οι αγωγοί, στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικά βραχυκυκλώματα, ψύχονται (μη αδιαβατική διαδικασία). Η ψύξη αυτή μειώνει την ειδική αντίσταση και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την χρονική εξέλιξη της ψύξης με μηχανισμούς απώλειας θερμότητας μέσω ακτινοβολήσης και φυσικής συναγωγής δίνεται ως εξής [20]:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{mC_p}(q_{cn} + q_r) = -\frac{1}{mC_p}(0.0205\rho_f^{0.5}D^{0.75}\Delta T^{1.25} + 0.0178D\varepsilon(T^4 - T_{amb}^4)) \quad (3.1.-4)$$

όπου mC_p η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μήκους του αγωγού, q_{cn} και q_r οι απώλειες θερμότητας μέσω φυσικής συναγωγής και ακτινοβολήσης αντίστοιχα, ρ_f η πυκνότητα του αέρα, D η διάμετρος του αγωγού (σε mm), ε ο συντελεστής ακτινοβολήσης και T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο ρυθμός πρόσληψης ηλιακής θερμικής ενέργειας θεωρείται ίσος με μηδέν καθώς είναι αμελητέος συγκριτικά με τους μηχανισμούς απώλειας θερμότητας.

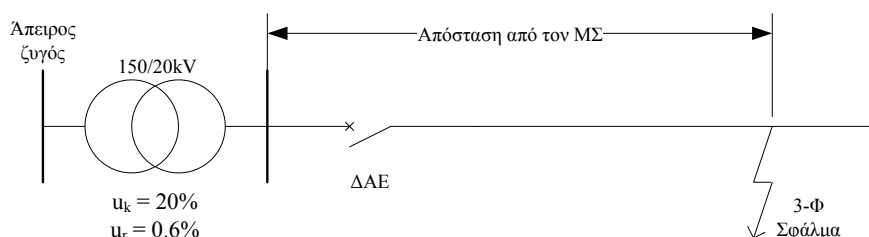
Καθώς η διαφορική εξίσωση περιέχει μη γραμμικούς όρους λύνεται μέσω αριθμητικών μεθόδων. Από την επίλυση της διαφορικής προκύπτει η αρχική θερμοκρασία και ειδική αντίσταση των αγωγών για το επόμενο βραχυκύκλωμα. Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται μέχρι το οριστικό άνοιγμα της γραμμής.

3.2. Εφαρμογή της μεθόδου

Εξετάζεται σαν παράδειγμα ένα τυπικό εναέριο δίκτυο μέσης τάσης μήκους 90 km προστατευόμενο από διακόπτη αυτόματης επαναφοράς και αποτελούμενο από 3 αγωγούς ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού 50 mm² σε οριζόντια διάταξη (σχήμα 3.2.-1). Η ονομαστική τάση της γραμμής είναι 20 kV. Ο μετασχηματιστής μεταφοράς 150/20 kV θεωρείται ονομαστικής ισχύος 50 MVA με σχετική τάση βραχυκύκλωσης $u_k = 20 \%$ και ωμική συνιστώσα της σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης $u_r = 0.6 \%$.

Το σύστημα προς τα ανάντη του ζυγού υψηλής τάσης του μετασχηματιστή 150/20 kV θεωρείται άπειρο και το σφάλμα μακριά από την γεννήτρια. Αυτό έχει ως επακόλουθο, οι υπολογιζόμενες τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και συνεπώς των θερμοκρασιών να είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές με ικανοποιητική όμως

προσέγγιση. Οι υπολογισμοί των ρευμάτων βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκαν για τριφασικό σφάλμα σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 60909 [24].



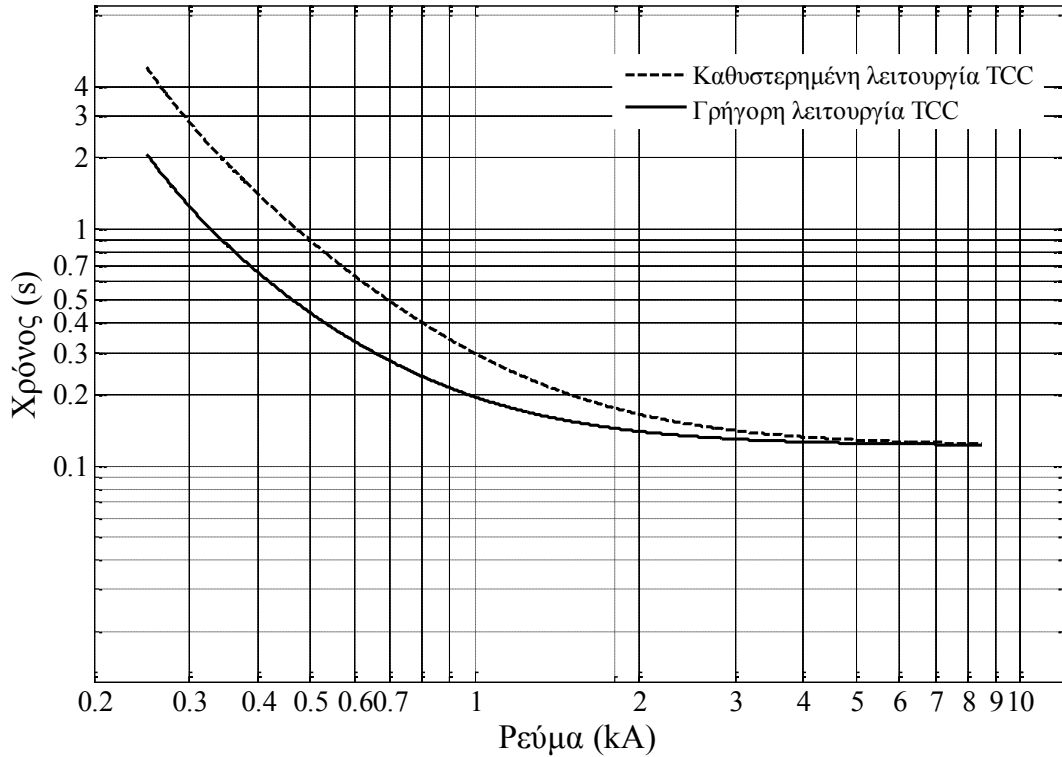
Σχήμα 3.2.-1: Το εξεταζόμενο δίκτυο μέσης τάσης

Η καμπύλη χρόνου ρεύματος του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς (time current curve) που επιλέχθηκε είναι εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου κατά το πρότυπο του IEEE. Το ρεύμα λειτουργίας I_s (pick-up current setting) επιλέχθηκε ίσο με 160 A ούτως ώστε το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης να είναι 1.5 φορές μεγαλύτερο και να μην προκαλείται λανθασμένη ενεργοποίηση από το ρεύμα εκκίνησης των μετασχηματιστών μέσης προς χαμηλής τάσης. Η εξίσωση της καμπύλης δίνεται ως εξής:

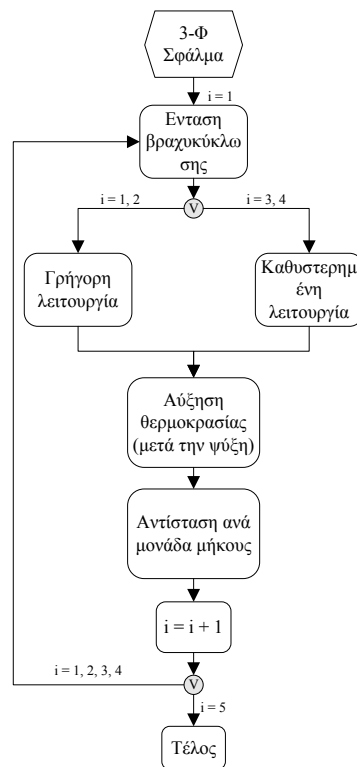
$$t_{trip} = \frac{kc}{(I/I_s)^b - 1} + L = \frac{28.2k}{(I/160)^2 - 1} + 0.1217 \quad (3.2.-1)$$

όπου b , c , και L σταθερές, και k η χρονική ρύθμιση η οποία ρυθμίζεται διαφορετικά για την αργή και την γρήγορη λειτουργία του ΔΑΕ. Ο κύκλος λειτουργίας αποτελείται από μια γρήγορη και τρεις αργές λειτουργίες και η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις λειτουργίες είναι 2 s. Οι καμπύλες του ΔΑΕ δίνονται στο σχήμα 3.2.-2.

Το διάγραμμα ροής του υπολογισμού των θερμικών επιπτώσεων του κύκλου λειτουργίας ενός ΔΑΕ φαίνεται στο σχήμα 3.2.-3. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία η οποία αποτελείται από τέσσερις επαναλήψεις (ίσες προς τον αριθμό των διακοπτόμενων βραχυκυκλωμάτων).



Σχήμα 3.2.-2: Καμπύλη χρόνου ρεύματος του Διακόπτη Αυτόματης Επαναφοράς



Σχήμα 3.2.-3: Διάγραμμα ροής του υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας

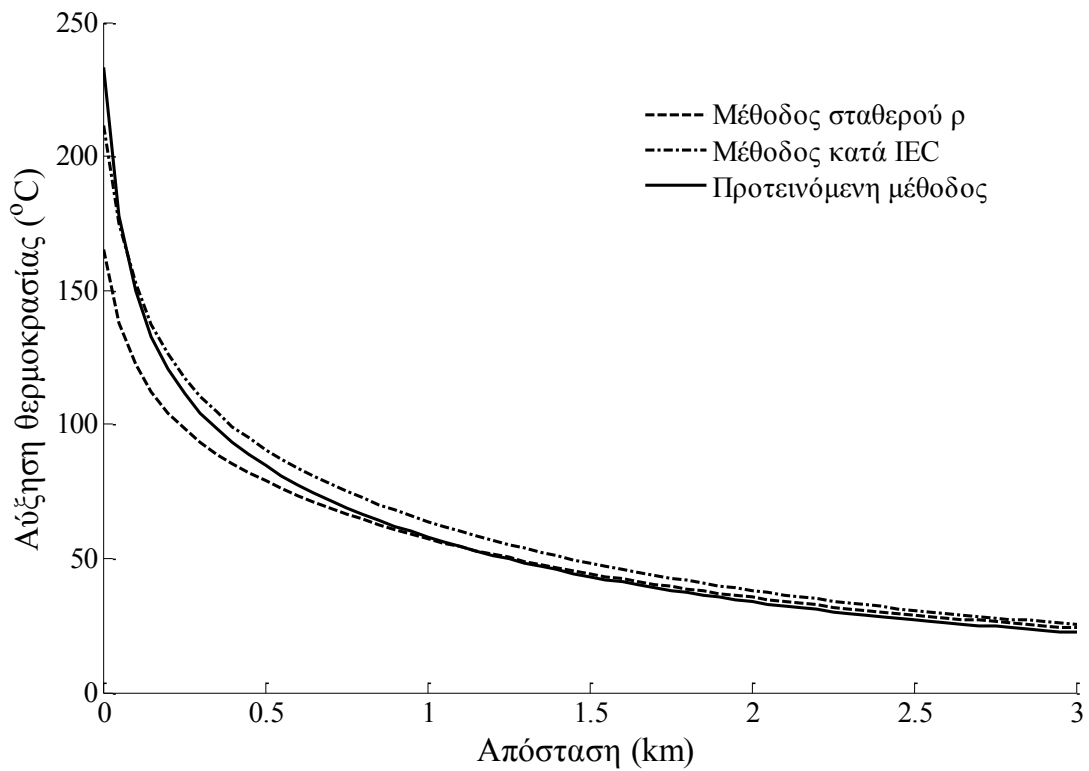
3.3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της μεθόδου φαίνονται στα σχήματα 3.3.-1 έως 3.3.-3. Η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί σε μεγαλύτερες αυξήσεις θερμοκρασίας σε σχέση με την μέθοδο του προτύπου του IEC στα πρώτα 100 m και μικρότερες κατάντη αυτής της αποστάσεως για τον ACSR 50 mm². Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω της (3.1.-2). Η μέθοδος κατά IEC χρησιμοποιεί την συνολική διάρκεια του σφάλματος σαν εκθέτη. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί το άθροισμα των αυξήσεων θερμοκρασίας. Ο λόγος των δυο μεθόδων μπορεί να δοθεί ως εξής:

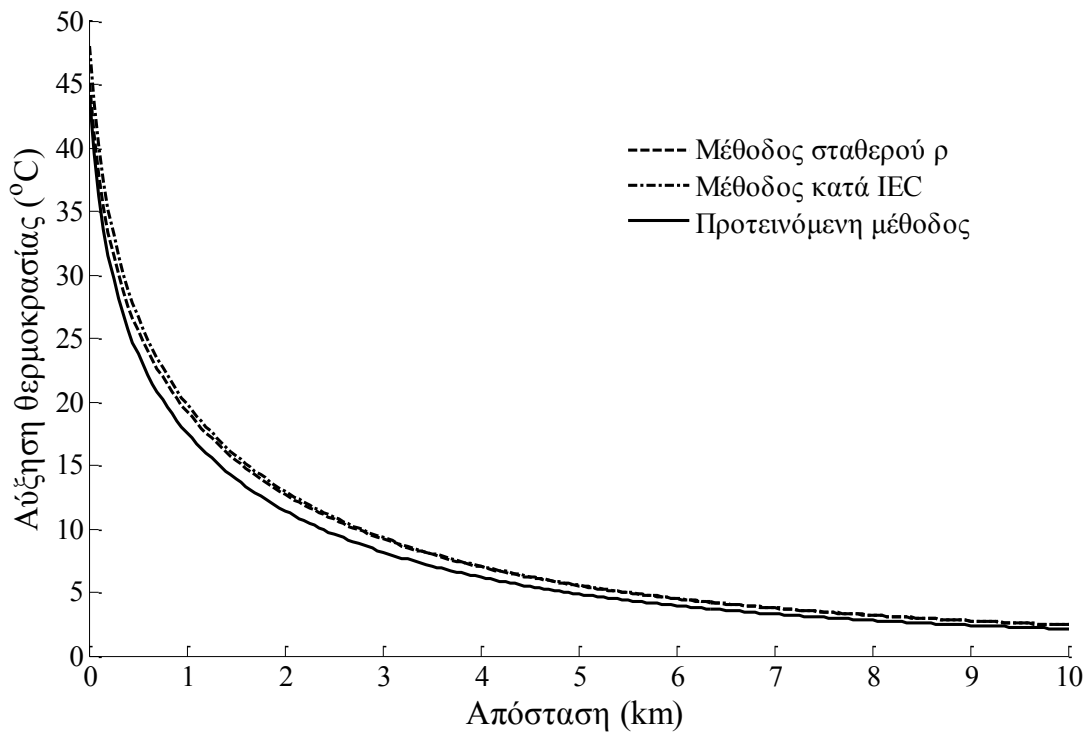
$$\frac{\rho_{final,IEC}}{\rho_{final,proposed}} = \frac{\rho_1 \exp(t_k \rho_1)}{\sum_{i=1}^4 \rho_i \exp(t_i \rho_i)} \quad (3.3.-1)$$

Ο λόγος των δυο μεθόδων δίνεται στο σχήμα 3.3.-4. Μπορεί να συναχθεί ότι η μέθοδος κατά IEC υποεκτιμά την αύξηση θερμοκρασίας από πολλαπλά βραχυκυκλώματα σε αποστάσεις για τις οποίες το πηλίκο κατά την (3.3.-1) είναι μικρότερο της μονάδας. Στην υπό εξέταση περίπτωση, αυτό ισχύει για τον αγωγό ACSR 50 mm² και αποστάσεις μικρότερες των 100 μέτρων. Στο υπόλοιπο της γραμμής, ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Ακόμα, ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας σε όλο το μήκος της γραμμής για τους αγωγούς ACSR 95, και 199,4 mm².

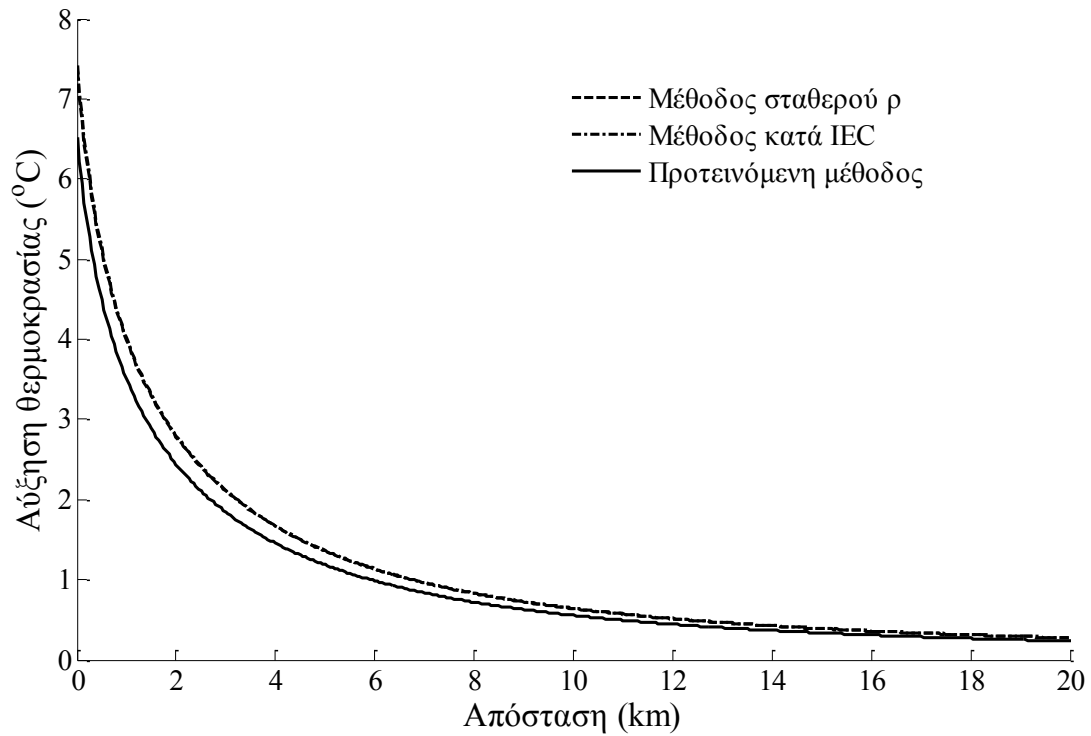
Η μέθοδος σταθερής ειδικής αντίστασης ακολουθεί την μεθοδολογία της προτεινόμενης μεθόδου χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν την αυξημένη ειδική αντίσταση. Από την εφαρμογή της προκύπτουν μικρότερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την προτεινόμενη μέθοδο για σφάλματα κοντά στον μετασχηματιστή καθώς δεν λαμβάνει υπ' όψιν την αυξημένη έκλυση θερμότητας ανά αμπέρ (q_R / I_{th}). Ωστόσο, σε μεγαλύτερες αποστάσεις δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στα μεγαλύτερα ρεύματα βραχυκύκλωσης της μεθόδου αυτής σε σχέση με την προτεινόμενη μέθοδο (εξαιτίας της σταθερής αντίστασης αγωγού). Ο λόγος των δυο μεθόδων δίνεται στο σχήμα 3.3.-5.



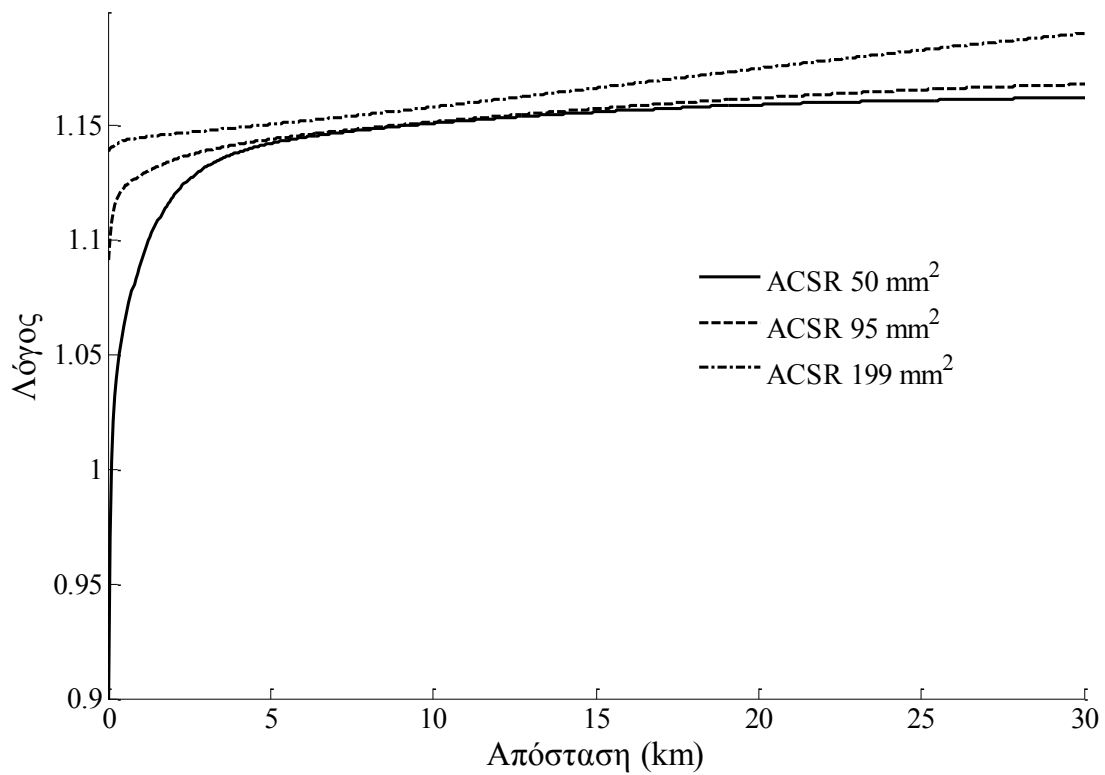
Σχήμα 3.3.-1: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 50 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφοι χρόνου καμπύλη



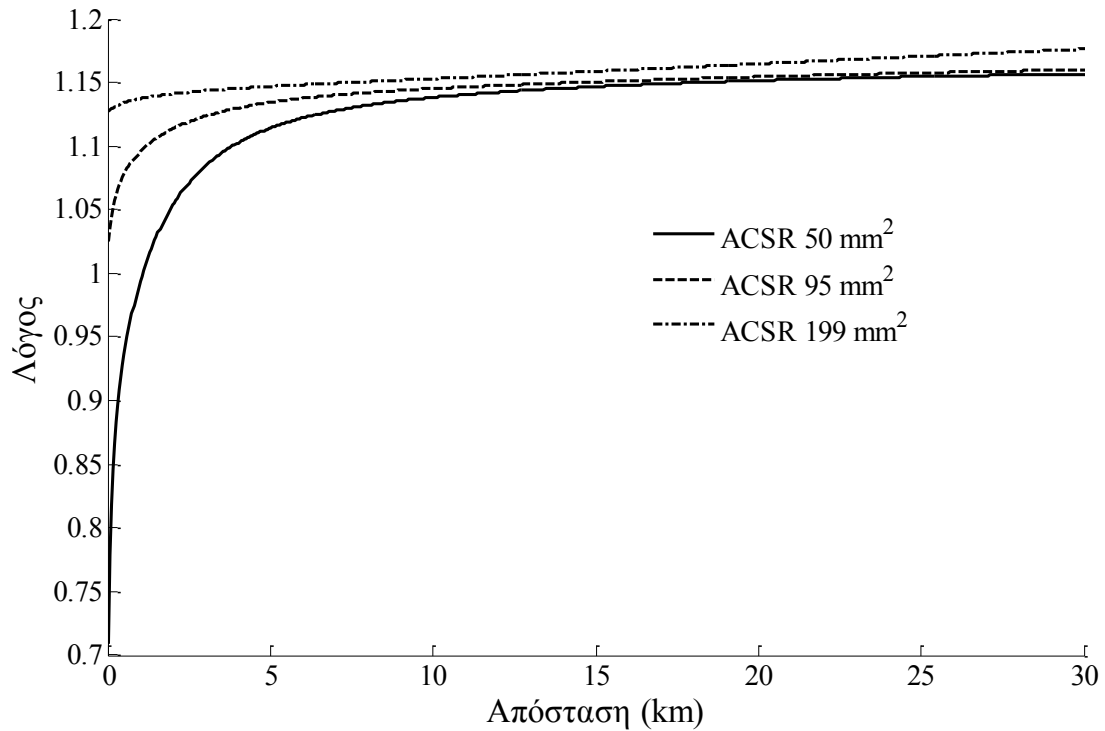
Σχήμα 3.3.-2: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 95 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφοι χρόνου καμπύλη



Σχήμα 3.3.-3: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 199,4 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου καμπύλη



Σχήμα 3.3.-4: Λόγος αυξήσεων θερμοκρασίας μεταξύ μεθόδου κατά IEC και προτεινόμενης μεθόδου

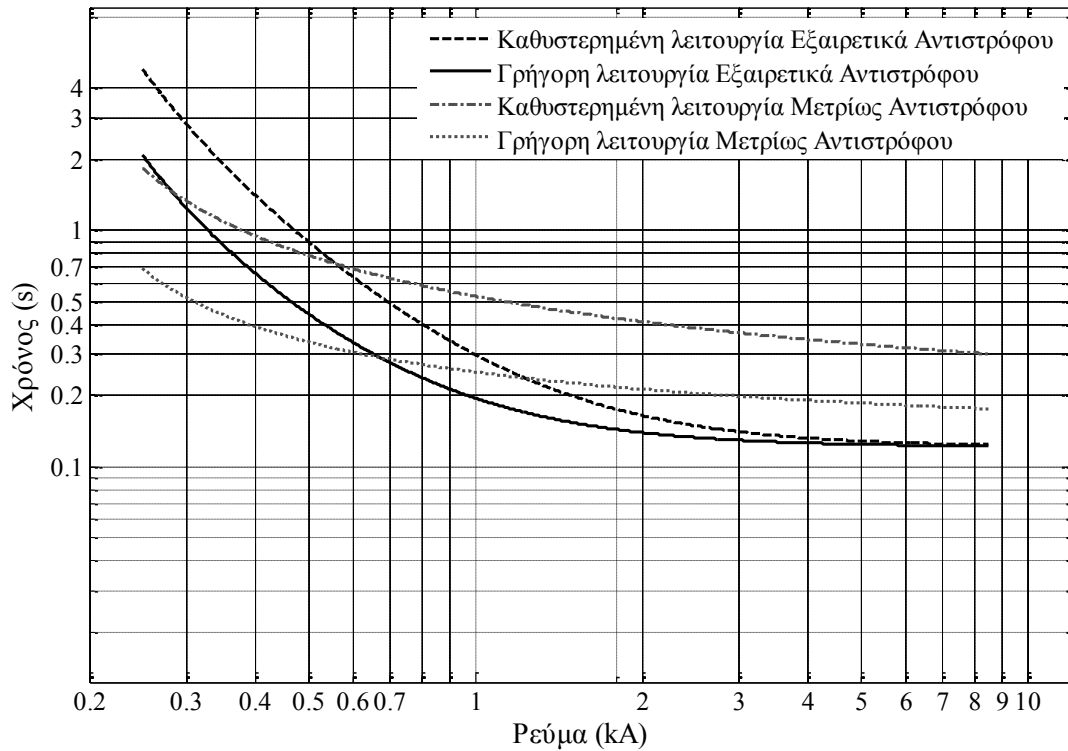


Σχήμα 3.3.-5: Λόγος αυξήσεων θερμοκρασίας μεταξύ μεθόδου σταθερού ρ και προτεινόμενης μεθόδου

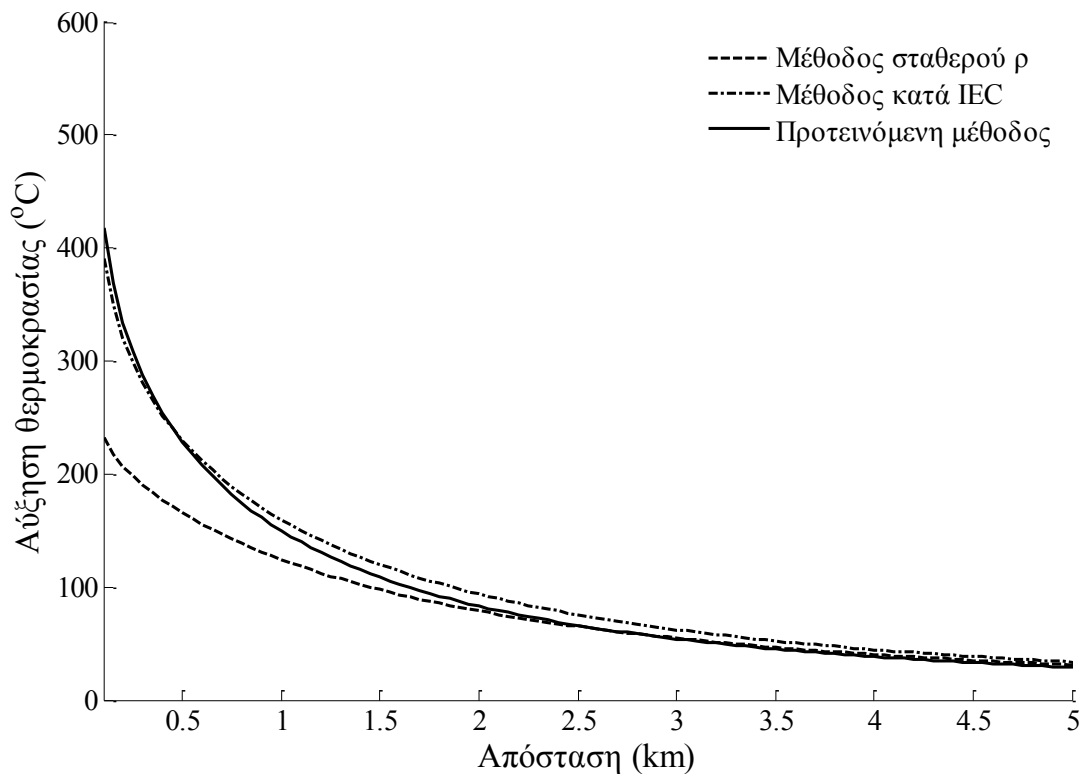
Στην συνέχεια, καταδεικνύεται η μεγάλη εξάρτηση της αύξησης της θερμοκρασίας των αγωγών από την καμπύλη χρόνου ρεύματος του ΔΑΕ. Για το λόγο αυτό επιλέγεται ένας ΔΑΕ μετρίως αντιστρόφου χρόνου με σταθερές $b = 0.02$, $c = 0.0515$, και $L=0.114$ (οι καμπύλες φαίνονται στο σχήμα 3.3-6). Η καμπύλη δίνεται ως εξής:

$$t_{trip,MI} = \frac{kc}{(I/I_s)^b - 1} + L = \frac{0.0515k}{(I/160)^{0.02} - 1} + 0.114 \quad (3.3.-2)$$

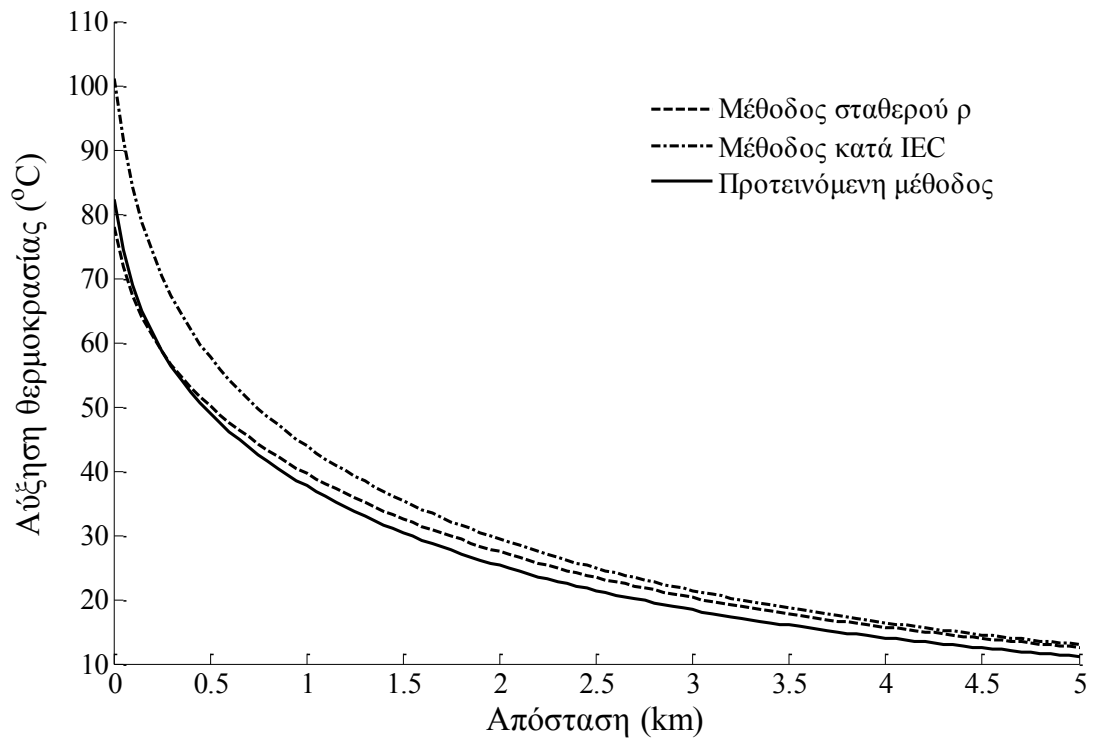
Τα αποτελέσματα των μεθόδων φαίνονται στα σχήμα 3.3.-7 έως 3.3.-9. Παρατηρείται η ίδια σχετική συμπεριφορά των τριών μεθόδων όπως και στα σχήματα 3.3.-1 έως 3.3.-3. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον αγωγό ACSR 50 mm² στα πρώτα 100 m προκύπτουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 660 °C (θερμοκρασία τήξεως του αλουμινίου) και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζονται στο σχήμα. Επιπλέον οι θερμοκρασίες των αγωγών είναι σημαντικά αυξημένες σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για ΔΑΕ εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου. Με βάση τα ανωτέρω, μπορεί να συναχθεί πως η χρήση εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου καμπυλών συστήνεται όταν η γραμμή προστατεύεται από διακόπτη αυτόματης επαναφοράς.



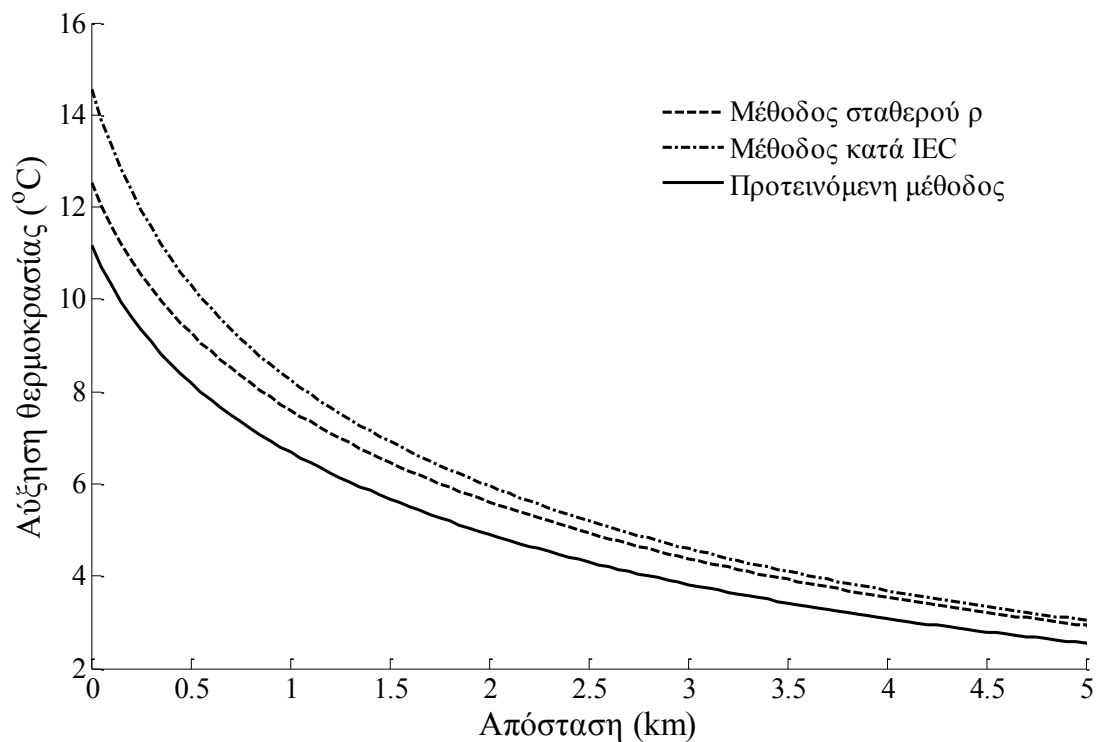
Σχήμα 3.3.-6: Εξαιρετικά αντίστροφες και μετρίως αντίστροφες καμπύλες χρόνου ρεύματος του ΔΑΕ



Σχήμα 3.3.-7: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 50 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με μετρίως αντίστροφου χρόνου καμπύλη



Σχήμα 3.3.-8: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 95 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με μετρίως αντίστροφου χρόνου καμπύλη



Σχήμα 3.3.-9: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 199,4 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με μετρίως αντίστροφου χρόνου καμπύλη

Τελικώς, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η επαναληπτική αυτόματη προσπάθεια ηλεκτροδότησης του αυτόματου μέσου προστασίας (ΑΔΕ ή ΔΑΕ) και ακολούθως οι ακούσιες χειροκίνητες επαναληπτικές ηλεκτροδοτήσεις από το συνεργείο προς εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, σημαίνουν αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών ACSR 50 mm² σε πολλαπλάσια τιμή της θερμοκρασίας ενός και μοναδικού βραχυκυκλώματος. Σε τέτοιες θερμοκρασίες προκαλείται σημαντική μείωση της μηχανικής αντοχής του αγωγού και αύξηση του βέλους κάμψεως (sag) μειώνοντας τις αποστάσεις ασφαλείας [15]. Ακόμη, προκαλείται χαλάρωση των κλώνων αλουμινίου λόγω διαστολής, ευνοώντας την διάβρωση του αγωγού. Επομένως, ο συγκεκριμένος αγωγός (ACSR 50 mm²) κρίνεται ακατάλληλος για τα πρώτα χιλιόμετρα κατάντη του υποσταθμού.

Ακολούθως, γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης των χρονικών παραμέτρων του ΔΑΕ στην θερμική καταπόνηση από τον κύκλο λειτουργίας του (χρονική διάρκεια ανάμεσα σε λειτουργίες και αριθμός γρήγορων προς αργών λειτουργιών).

Αρχικώς, μεταβάλλεται ο κύκλος λειτουργίας του ΔΑΕ από μια γρήγορη και τρεις αργές λειτουργίες σε δυο γρήγορες και δυο αργές. Στην περίπτωση εξαιρετικά αντίστροφης καμπύλης χρόνου ρεύματος η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από 1 °C (συγκεκριμένα 0,73, 0,09, και 0,02 °C για τους ACSR 50, 95, και 199,4 mm² αντίστοιχα). Επομένως, η μεταβολή αυτή δεν είχε κάποιο αξιόλογο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση μετρίως αντίστροφης καμπύλης χρόνου ρεύματος η επίδραση της μεταβολής είναι πολύ μεγαλύτερη. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας φτάνει τους 98, 8,49, και 0,96 °C για τους ACSR 50, 95, και 199,4 mm² αντίστοιχα. Ακόμα, με την μεταβολή του κύκλου λειτουργίας, η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη από την θερμοκρασία τήξεως του αλουμινίου για τον ACSR 50 mm².

Στην συνέχεια, μεταβάλλεται η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις διαδοχικές λειτουργίες του ΔΑΕ. Η μεταβολή αυτή επηρεάζει τον χρόνο ψύξης. Συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια μεταβάλλεται από τα 2 s στα 10 s. Καθώς η ψύξη είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας του αγωγού προς την θερμοκρασία του περιβάλλοντος υψωμένη σε δύναμη μεγαλύτερη της μονάδος, η επίδραση της μεταβολής αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μετρίως αντίστροφης καμπύλης. Πράγματι, στην περίπτωση εξαιρετικά αντίστροφης καμπύλης χρόνου ρεύματος η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι 8,57, 0,6, και 0,05 °C για τους ACSR 50, 95, και 199,4

mm² αντίστοιχα, και μειώνεται με την απόσταση από τον υποσταθμό. Στην περίπτωση μετρίως αντίστροφής καμπύλης χρόνου ρεύματος η μέγιστη διαφορά φτάνει τους 25,08, 1,21, και 0,08 °C για τους ACSR 50, 95, και 199,4 mm² αντίστοιχα.

3.4. Αριθμητική μέθοδος

Στην συνέχεια, η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίνεται με την αριθμητική λύση της διαφορικής εξίσωσης, η οποία περιγράφει την θέρμανση του αγωγού εξαιτίας του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η αναλυτική εξίσωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης $i(t)$ δίνεται ως [26]:

$$i(t) = \sqrt{2}I_{sc}'' \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin(\varphi - \psi)e^{-t/\tau} \right] \quad (3.4.-1)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X_{sc}}{R_{sc}} \right) \quad (3.4.-2)$$

$$\tau = \frac{X_{sc}}{\omega R_{sc}} \quad (3.4.-3)$$

όπου τ η χρονική σταθερά του κυκλώματος, φ η φασική γωνία του ρεύματος βραχυκύκλωσης, και ψ η γωνία της τάσεως κατά την εκκίνηση του βραχυκυκλώματος. Η γωνία ψ επιλέγεται ίση με μηδέν, καθώς η επιλογή αυτή μεγιστοποιεί την ενέργεια του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (υπό την προϋπόθεση ότι η διάρκεια του βραχυκυκλώματος είναι μεγαλύτερη από 0,01 s για συχνότητα συστήματος 50 Hz [26]), και συνεπώς και την αύξηση θερμοκρασίας.

Η διαφορική εξίσωση, η οποία περιγράφει την αδιαβατική θέρμανση, δίνεται:

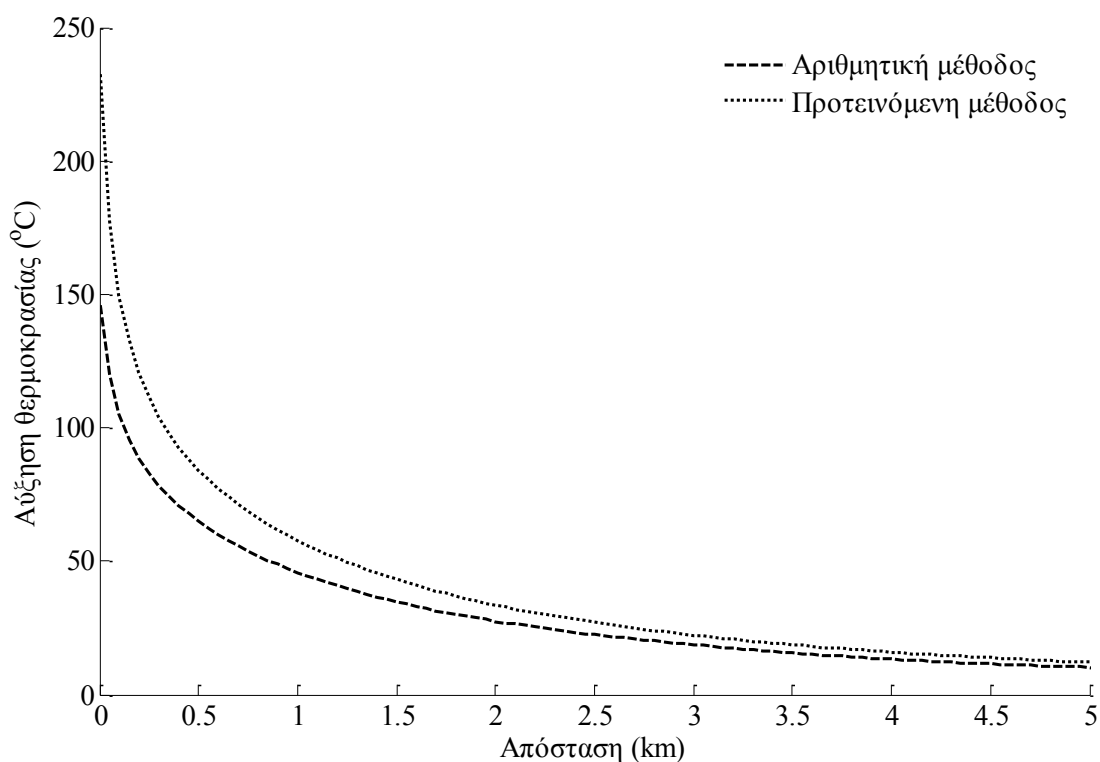
$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{(mC_p)_{Al}} (i(t))^2 R_{line}(T) \quad (3.4.-4)$$

όπου $(mC_p)_{Al}$ είναι η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μήκους του αλουμινίου του αγωγού (σε J/(m °C)). Η επιλογή της χρήσης της θερμοχωρητικότητας μόνο του αλουμινίου έγινε ούτως ώστε η αριθμητική μέθοδος να συμμορφωθεί προς την προτεινόμενη μέθοδο (και την μέθοδο κατά IEC), οι οποίες χρησιμοποιούν μόνο την

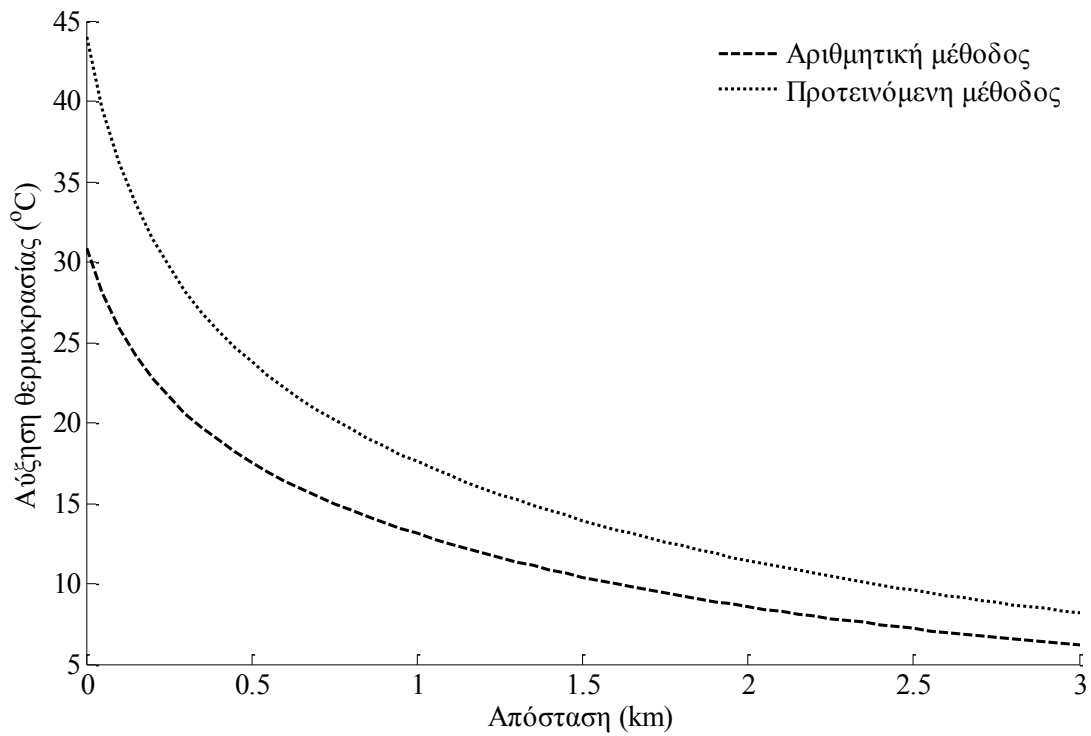
διατομή του αλουμινίου για την εξαγωγή της ισοδύναμης πυκνότητας θερμικού ρεύματος S_{th} .

Η ανωτέρω διαφορική εξίσωση λύνεται αριθμητικά, παρομοίως με την διαφορική εξίσωση (3.1.-4) η οποία περιγράφει την ψύξη. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε ίσο προς 0,0001 s, σημαντικά μικρότερο αυτού που χρησιμοποιήθηκε για την διαφορική της ψύξης. Η επιλογή αυτή έγινε εξαιτίας του περιοδικού μέρους του ρεύματος βραχυκύκλωσης συχνότητας 50 Hz. Η αντίσταση του αγωγού ανά μονάδα μήκους R_{line} ανανεώνεται σε κάθε βήμα. Τοιουτοτρόπως, η αριθμητική μέθοδος λαμβάνει υπ' όψιν την αύξηση της ωμικής αντίστασης κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

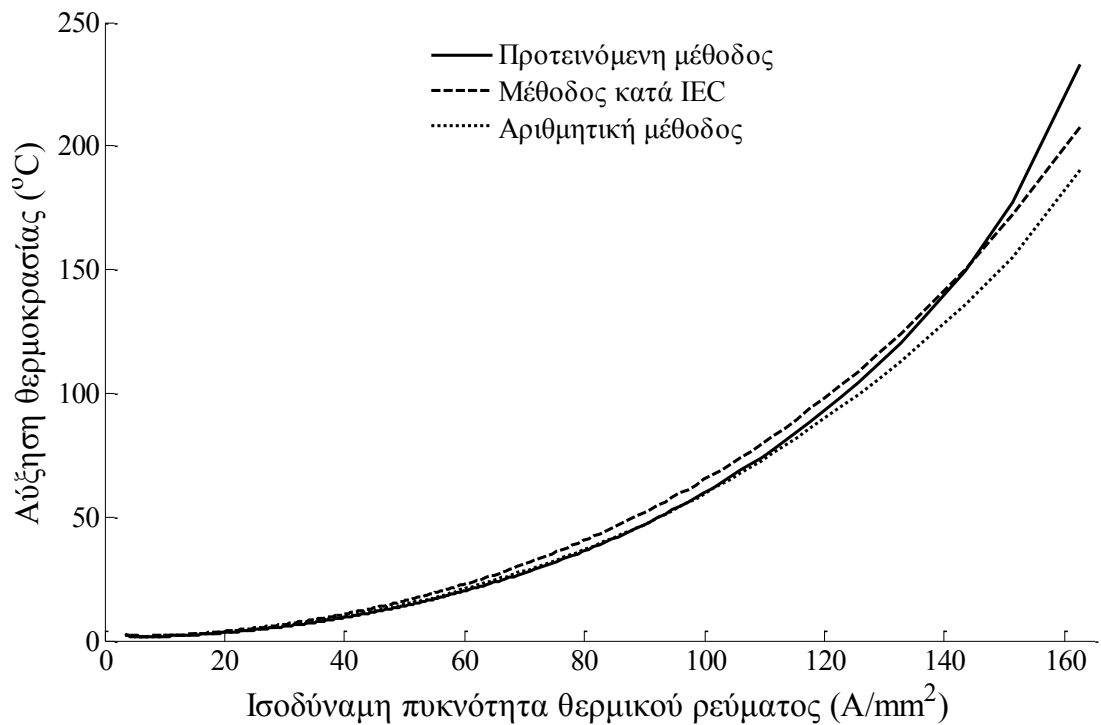
Τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης της (3.4.-4) δίνονται στα σχήματα 3.4-1 και 3.4-2 για τους αγωγούς ACSR 50 και 95 mm². Η προτεινόμενη μέθοδος δίνει μεγαλύτερες αυξήσεις θερμοκρασίας σε σχέση με την αριθμητική μέθοδο στα πρώτα 1,25 και 0,15 km από τον υποσταθμό, και μικρότερες σε μεγαλύτερες αποστάσεις, για τους ACSR 50 και 95 mm² αντιστοίχως. Στην περίπτωση του ACSR 199,4 mm², η αριθμητική μέθοδος δίνει μεγαλύτερες αυξήσεις θερμοκρασίας σε όλο το μήκος της γραμμής.



Σχήμα 3.4.-1: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 50 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφο χρόνο καμπύλη



Σχήμα 3.4.-2: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 95 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου καμπύλη



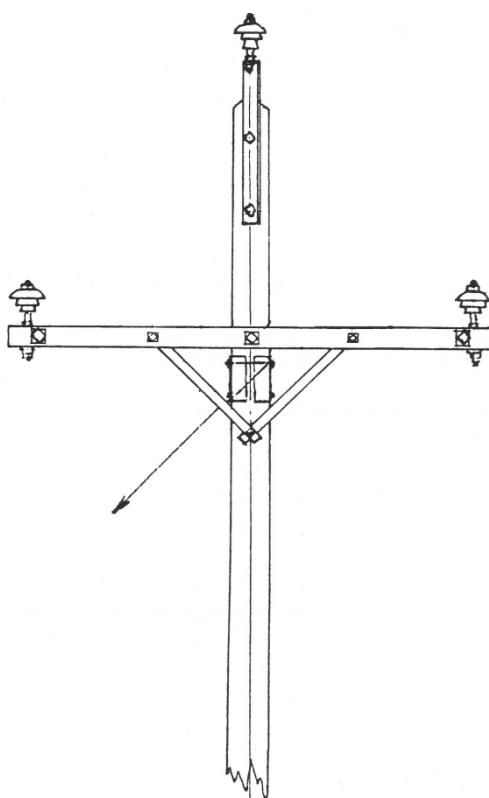
Σχήμα 3.4.-3: Αύξηση θερμοκρασίας αγωγού ACSR 50 mm² από τον κύκλο λειτουργίας του ΔΑΕ με εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου καμπύλη ως συνάρτηση της ισοδύναμης πυκνότητας θερμικού ρεύματος

Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει καλή συμφωνία με την αριθμητική μέθοδο. Ακόμα, η προτεινόμενη μέθοδος υπερεκτιμά την αύξηση θερμοκρασίας σε σχέση με την αριθμητική μέθοδο, όταν η ισοδύναμη πυκνότητα θερμικού ρεύματος είναι μεγάλη (δηλαδή όταν το σφάλμα είναι κοντά στον υποσταθμό και η διατομή του αγωγού είναι μικρή - βλ. σχήμα 3.4.-3).

4. Ανάπτυξη κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων ξύλινου στύλου και επαλήθευση αυτού μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

4.1. Περιγραφή ξύλινων στύλων

Ο ξύλινος στύλος ο οποίος χρησιμοποιείται σαν παράδειγμα στην ανάπτυξη του μοντέλου είναι ύψους 12 m κολουροκωνικού σχήματος. Η διάμετρος του στην βάση είναι 30,8 cm και η κωνικότητα του είναι 1,07 cm/m. Η ξύλινη τραβέρσα είναι τετραγωνικής διατομής 10 cm x 12 cm ενώ η σιδερένια είναι 7,5 cm x 10 cm και μήκους 2,5 m. Τα χιαστί υποστηρίξεις της τραβέρσας, όταν υπάρχουν, είναι σιδερένια. Στο σχήμα 4.1.-1 φαίνεται η βασική γεωμετρία του στύλου.



Σχήμα 4.1.-1: Σχέδιο ξύλινου στύλου-τραβέρσας

Ο στύλος θεωρείται πως είναι εμποτισμένος με C.C.A. (chromate copper arsenate) για τον περιορισμό ανάπτυξης μυκήτων υπεύθυνων για την μείωση της μηχανικής αντοχής του στύλου [84]. Η επεξεργασία αυτή φτάνει μέχρι βάθος ίσο προς το 30 % της ακτίνας του στύλου [43]. Δηλαδή η καρδιά του ξύλου είναι ακατέργαστη ενώ ο φλοιός έχει εμποτιστεί. Η ξύλινη τραβέρσα, λόγω της μικρής της διατομής, θεωρείται ότι είναι εξ ολοκλήρου εμποτισμένη. Η περιεχόμενη υγρασία του φλοιού στην μέση του στύλου M είναι 11,7 % για ξηρό καιρό και 22,7 % για καιρό με αυξημένη υγρασία. Η ειδική αντίσταση των διάφορων τμημάτων υπολογίζεται όπως στην υποπαράγραφο 1.4.1.

4.2. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο στο στύλο προκύπτει άμεσα από τις εξισώσεις του Maxwell. Καθώς η συχνότητα είναι πολύ μικρή, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι αποζευγμένα. Οπότε:

$$\nabla \times \vec{E} \cong 0 \quad (4.2.-1)$$

Καθώς:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.2.-2)$$

$$j\omega\rho = -\nabla \cdot \vec{J} \quad (4.2.-3)$$

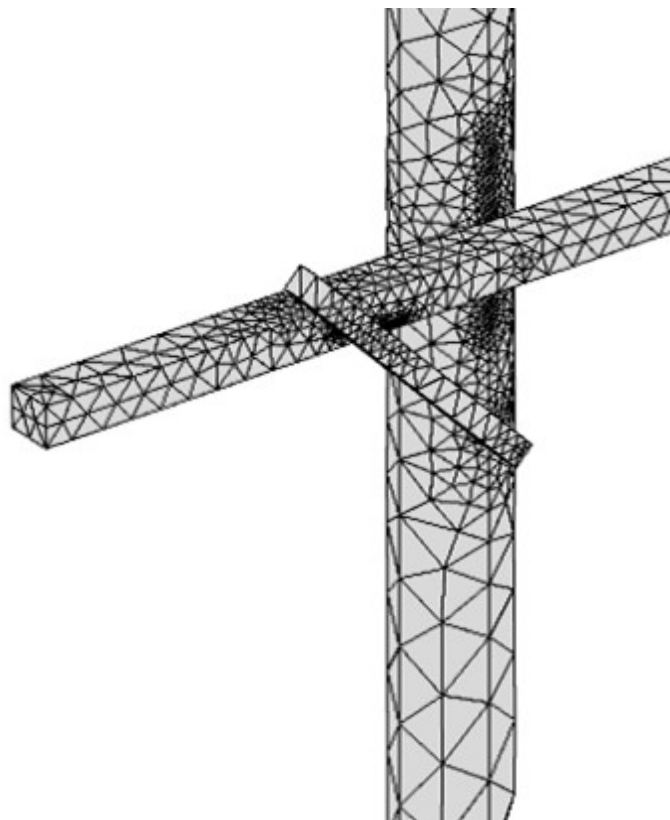
$$\nabla \cdot \varepsilon \vec{E} = \rho \quad (4.2.-4)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4.2.-5)$$

όπου ρ το χωρικό φορτίο (εξαιτίας του χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος αγωγιμότητας), \vec{J} η πυκνότητα ρεύματος, ω η κυκλική συχνότητα, ε η διηλεκτρική σταθερά του χώρου, και V το δυναμικό. Τελικώς, το ηλεκτρικό πεδίο προκύπτει:

$$\nabla \cdot \left(\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = \nabla \cdot \left(\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega} \right) \nabla V = 0 \quad (4.2.-6)$$

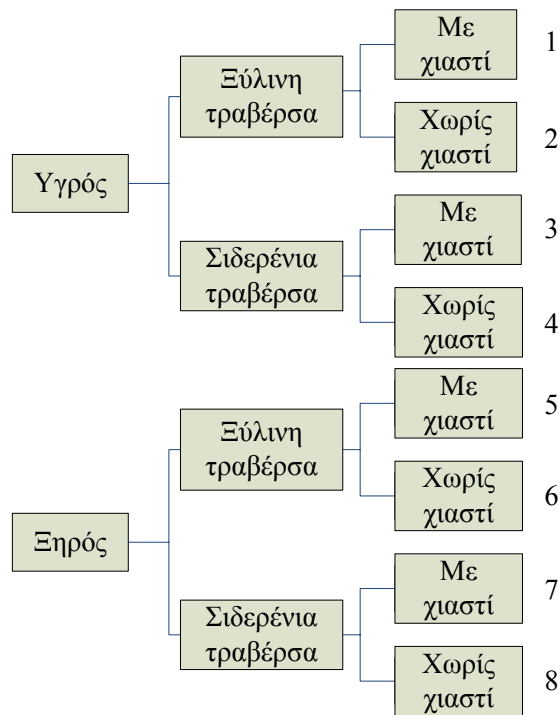
Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τα φαινόμενα λύνεται στην γεωμετρία του χώρου. Μέρος της γεωμετρίας και διαχωρισμός της σε τετράεδρα φαίνεται στο σχήμα 4.2.-1.



Σχήμα 4.2.-1: Μέρος της γεωμετρίας του στύλου και διαχωρισμός σε τετράεδρα

Οι ακόλουθες οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν: η βάση του στύλου έχει μηδενικό δυναμικό (γ_1), η κορυφή της βίδας στερέωσης του μονωτήρα έχει δυναμικό ίσο με V_{app} , η αυξημένη ακτινική αντίσταση μοντελοποιήθηκε ως ανισοτροπία της αγωγιμότητας (μειωμένη αγωγιμότητα κατά 1.83 φορές για τους x και y άξονες [43]).

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε οκτώ διαφορετικές μορφολογίες στύλου-τραβέρσας. Οι μορφολογίες και η αρίθμηση τους φαίνονται στο σχήμα 4.2.-2. Το πλέγμα διακριτοποίησης αποτελείτο από 148610, 104657, 143250, και 99297 τετράεδρα για τις μορφολογίες 1 και 5, 2 και 6, 3 και 7, και 4 και 8 αντίστοιχα. Περαιτέρω βελτίωση του πλέγματος δεν είχε ως αποτέλεσμα αλλαγή των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.2.-2: Οι υπό εξέταση μορφολογίες

Θεωρώντας μια γραμμή μέσης τάσης 20 kV και ένα ρυπαθέντα μονωτήρα αντιστάσεως της τάξεως των 1 MΩ (ούτως ώστε εμφανίζεται ερπυσμός επί της επιφανείας του), η επιβαλλόμενη τάση επί της κατασκευής στύλου-τραβέρσας στην υγρή κατάσταση είναι της τάξεως των 4700 V. Με αντίστοιχη θεώρηση, στην ξηρή περίπτωση η επιβαλλόμενη τάση είναι της τάξεως των 8660 V. Η επιβαλλόμενη τάση μεταβάλλεται από κατασκευή σε κατασκευή (καθώς μεταβάλλεται η αντίσταση) ωστόσο θεωρήθηκε επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις ένα επίπεδο τάσης για την ξηρή κατάσταση και ένα για την υγρή, ώστε τα προκύπτοντα ρεύματα διαρροής να είναι συγκρίσιμα.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίστηκε η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος ανάμεσα στην καρδιά και τον φλοιό (I_{heart} και I_{sap} αντιστοίχως) στην βάση και την μέση του στύλου (σε ύψος 6 m από την βάση). Ακόμη, υπολογίστηκε η φαινόμενη αντίσταση του στύλου R_{con} . Επιπλέον, υπολογίστηκε η τάση που επιβάλλεται στην καρδιά και φλοιό του στύλου $V_{pole,heart}$ και $V_{pole,sap}$ αντίστοιχα. Η τάση $V_{pole,heart}$ είναι ίση προς την επιβαλλόμενη V_{app} μείον την πτώση τάσης στην τραβέρσα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των αντιστάσεων τραβέρσας και στύλου. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 4.2.-1.

# Κατασκευή	R_{con} (MΩ)	V_{app} (V)	I_{leak} (μA)	I_{heart} (%)		I_{sap} (%)		$V_{pole,sap}$ (%)	$V_{pole,heart}$ (%)
				Βάση	Μέση	Βάση	Μέση		
1	0,510	4700	9222	8,3	64,9	91,7	35,1	63,7	64,0
2	0,642	4700	7326	8,3	64,9	91,7	35,1	53	53,2
3	0,285	4700	16522	8,3	64,9	91,7	35,1	99,5	100
4	0,300	4700	15682	8,3	64,9	91,7	35,1	99,7	100
5	105,283	8660	82,25	98,1	95,7	1,9	4,3	10,2	10,2
6	168,252	8660	51,47	98,1	95,7	1,9	4,3	6,8	6,8
7	10,734	8660	806,83	98,1	95,7	1,9	4,3	99,7	100
8	11,443	8660	756,81	98,1	95,7	1,9	4,3	99,9	100

Πίνακας 4.2.-1: Αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

R_{con} : Φαινόμενη αντίσταση του στύλου

V_{app} : Επιβαλλόμενη τάση

I_{leak} : Ρεύμα διαρροής

I_{heart} : Ρεύμα ρέον διαμέσου της καρδιάς

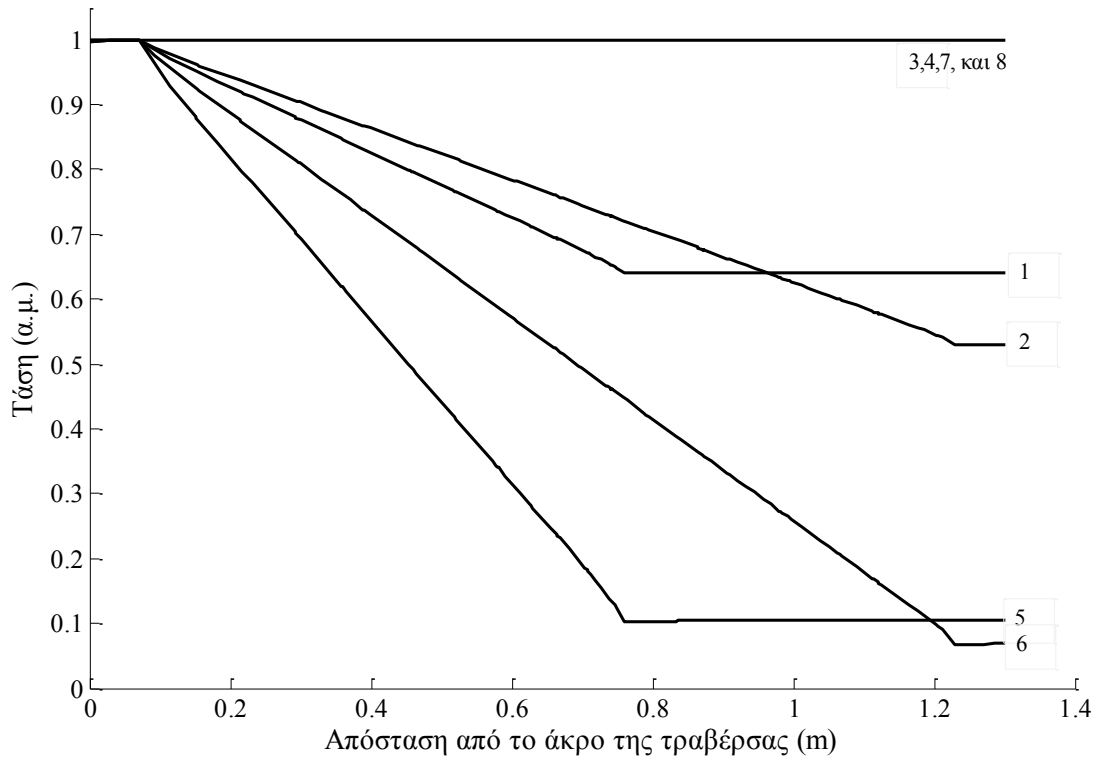
I_{sap} : Ρεύμα ρέον διαμέσου του φλοιού

$V_{pole,heart}$: Επιβαλλόμενη τάση στην καρδιά του στύλου

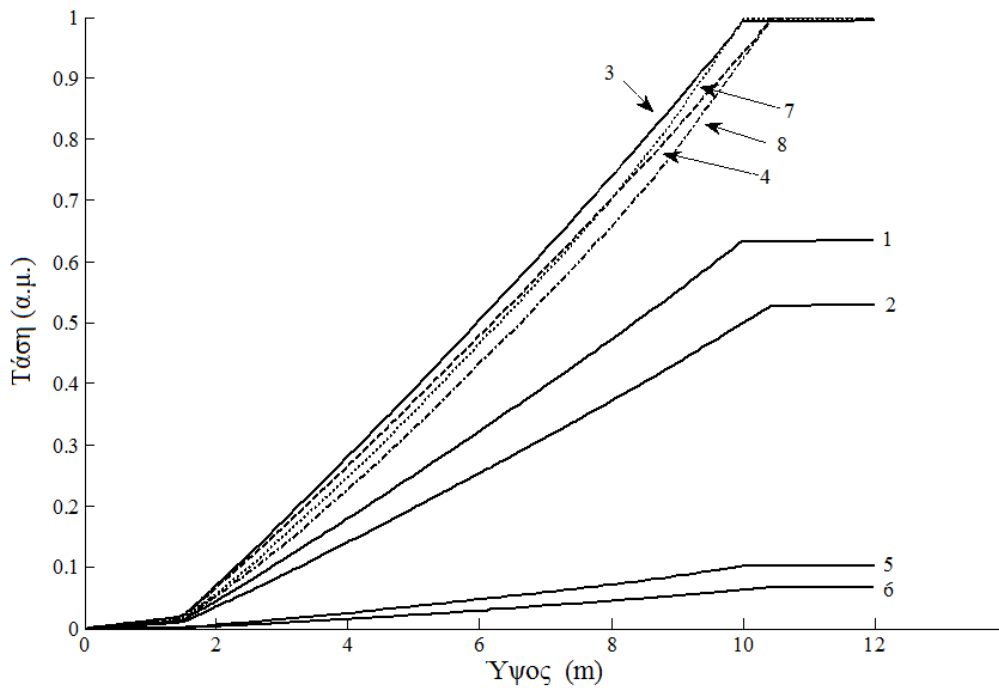
$V_{pole,sap}$: Επιβαλλόμενη τάση στον φλοιό του στύλου

Η τάση στο κέντρο της τραβέρσας κατά μήκος της φαίνεται στο σχήμα 4.2.-3. Επιπλέον, η τάση του φλοιού κατά μήκος μιας νοητής γραμμής ακολουθούσας την κωνικότητα του στύλου (η γραμμή δεν τέμνει τις βίδες) φαίνεται στο σχήμα 4.2.-4.

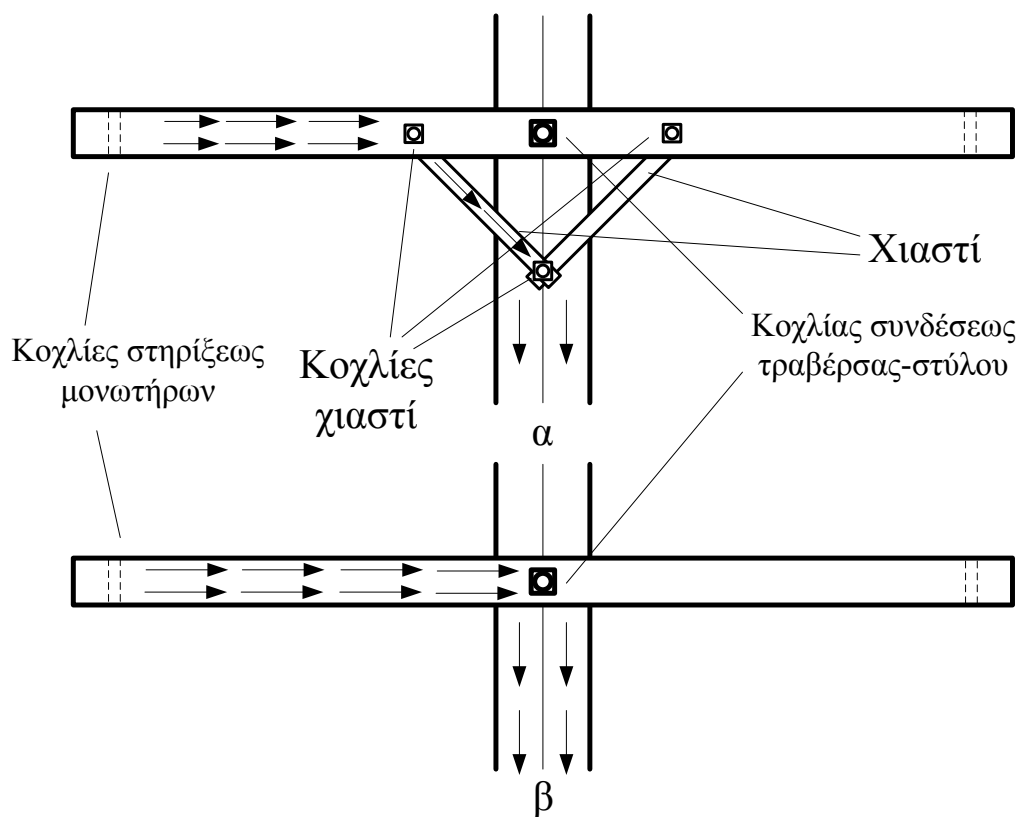
Τα μήκη της τραβέρσας πίσω από τον κοχλία στηρίξεως του μονωτήρα και μετά τον κοχλία συνδέσεως τραβέρσας-στύλου δεν υπόκεινται σε ροή ρεύματος, και επομένως βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό με τους αντίστοιχους κοχλίες (σχήμα 4.2.-3). Αντιστοίχως, η τάση του στύλου σε ύψος μεγαλύτερο του κοχλία συνδέσεως τραβέρσας-στύλου δεν μεταβάλλεται (σχήμα 4.2.-4). Η ροή του ρεύματος απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 4.2.-5. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως καθώς ο κοχλίας στηρίξεως του μονωτήρα διαπερνά την τραβέρσα, δεν παρατηρείται ακτινική ροή ρεύματος. Ακόμη, κατά μήκος του στύλου στην ξηρή κατάσταση δεν παρατηρείται ακτινική ροή ρεύματος. Αντιθέτως, όταν ο στύλος βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, παρατηρείται σημαντική ακτινική ροή από την καρδιά προς τον φλοιό στα ύψη όπου αλλάζει η περιεχόμενη υγρασία.



Σχήμα 4.2.-3: Τάση κατά μήκος της τραβέρσας
Αρίθμηση μορφολογιών όπως στο σχήμα 4.2.-2



Σχήμα 4.2.-4: Δυναμικό κατά μήκος του στύλου
Αρίθμηση μορφολογιών όπως στο σχήμα 4.2.-2

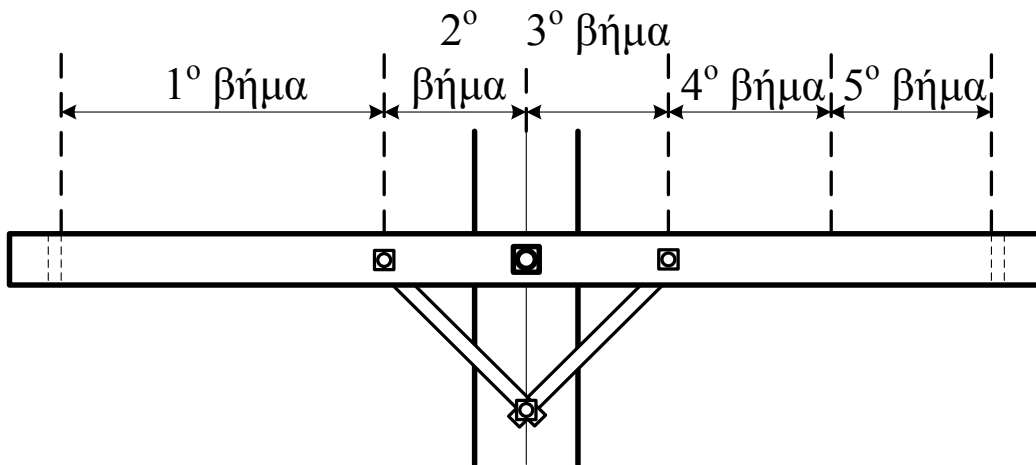


Σχήμα 4.2.-5: Σχηματική απεικόνιση της ροής του ρεύματος
 α: Με χιαστί
 β: Χωρίς χιαστί

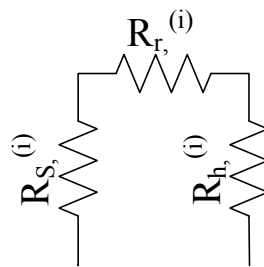
4.3. Κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων

Για την ανάλυση του στύλου με κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων χρησιμοποιήθηκαν 24 βήματα του 0,5 m. Αντίστοιχα, για την ξύλινη τραβέρσα χρησιμοποιήθηκαν 5 βήματα μεταβλητού μήκους ώστε να προσεγγίζεται με καλή ακρίβεια η θέση των σημείων των κοχλιών χωρίς να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός βημάτων. Τα τμήματα της τραβέρσας που αναπαρίστανται από τα 5 βήματα φαίνονται στο σχήμα 4.3.-1.

Στο σχήμα 4.3.-2 φαίνεται ένα βήμα ενός κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων. $R_h^{(i)}$, $R_s^{(i)}$, και $R_r^{(i)}$ είναι οι αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3.-1: Τα τμήματα της τραβέρσας που αναπαρίστανται από τα 5 βήματα του δικτύου αντιστάσεων



Σχήμα 4.3.-2: Βήμα κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων

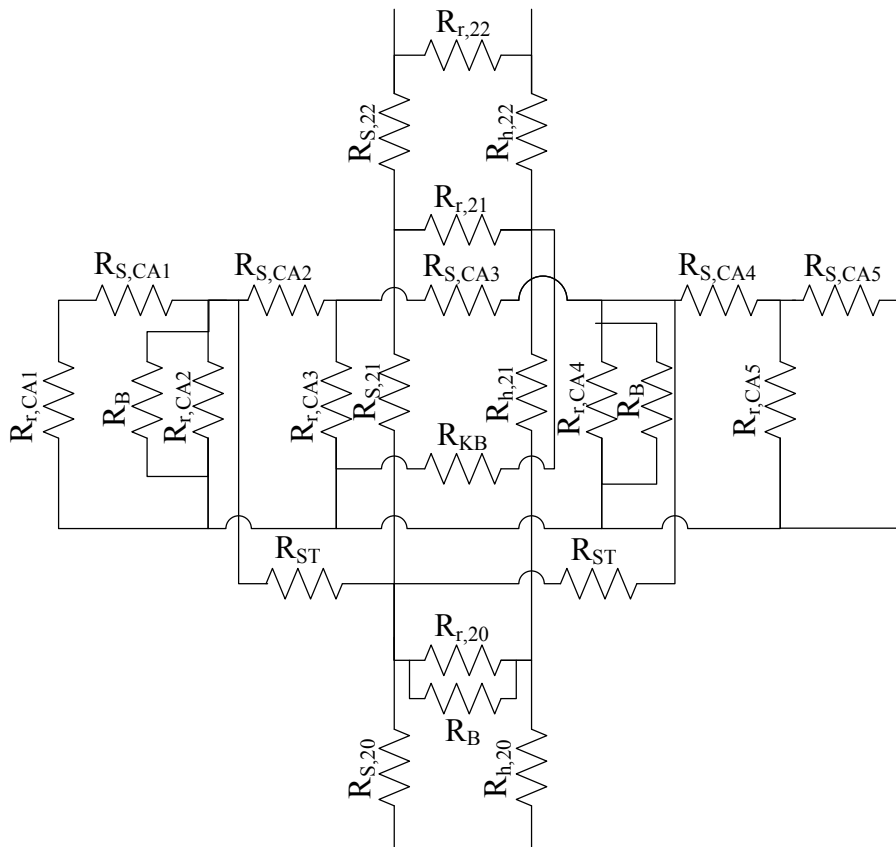
$R_h^{(i)}$, $R_s^{(i)}$, και $R_r^{(i)}$: Αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος

Από το δίκτυο αντιστάσεων υπολογίζεται η αντίσταση της κατασκευής R_{con} , το ρεύμα διαρροής I_{leak} , και ειδικότερα το ρεύμα διαμέσου της καρδιάς I_{heart} και του φλοιού I_{sap} . Ακόμη, υπολογίζεται η κατανομή της τάσης κατά μήκος του στύλου.

Στην συνέχεια, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και του δικτύου αντιστάσεων όπως προτείνεται από τους Wong και Rahmat [45]. Ακόμη, προτείνεται ένα νέο δίκτυο αντιστάσεων το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Στο σχήμα 4.3.-3 φαίνονται τα μοντέλα του στύλου, της τραβέρσας και η μεταξύ τους διασύνδεση όπως περιγράφονται στην [45]. Στο σχήμα 4.3.-4 φαίνεται το προτεινόμενο δίκτυο αντιστάσεων. Έχουν γίνει οι ακόλουθες αλλαγές:

--Πρώτον, παύουν να υφίστανται οι αντιστάσεις $R_{r,CA}$ καθώς, δεν υπάρχει ακτινική ροή ρεύματος στην τραβέρσα.



Σχήμα 4.3.-3: Μοντέλα τραβέρσας-στύλου και η μεταξύ τους διασύνδεση όπως στην [45]

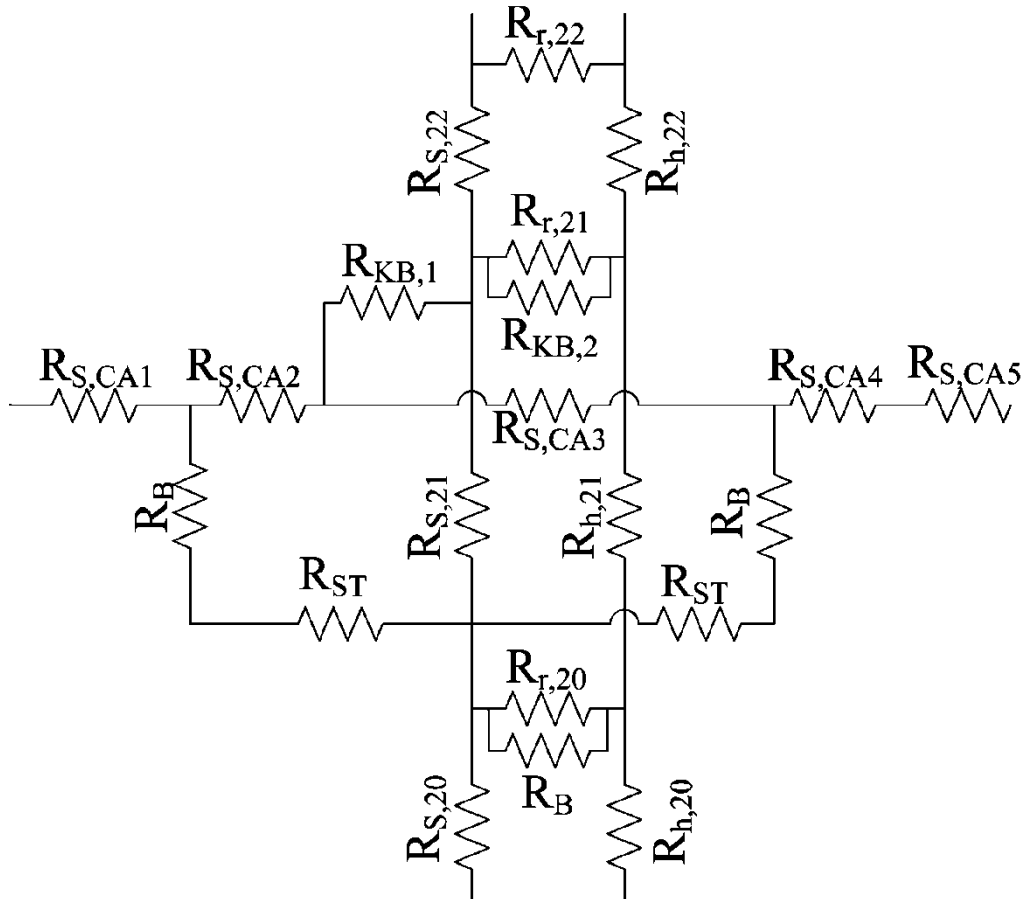
R_{st} : Αντίσταση αντηρίδας

R_B : Αντίσταση κοχλία συνδέσεως τραβέρσας και στύλου

$R_{h,i}$, $R_{s,i}$, και $R_{r,i}$: Αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος του στύλου

$R_{h,CAi}$, $R_{s,CAi}$, και $R_{r,CAi}$: Αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος της τραβέρσας

--Δεύτερον, καθώς ο κοχλίας διαπερνά την τραβέρσα και τον στύλο, η αντίστασή του χωρίζεται σε δύο μέρη $R_{KB,1}$ και $R_{KB,2}$. Το πρώτο μέρος αναπαριστά την αντίσταση του μετάλλου στην πλευρά της τραβέρσας και το δεύτερο στην πλευρά του στύλου. Η $R_{KB,2}$ γεφυρώνει τον φλοιό και την καρδιά.



Σχήμα 4.3.-4: Προτεινόμενα μοντέλα τραβέρσας-στύλου και η μεταξύ τους διασύνδεση

R_{st} : Αντίσταση αντηρίδας

R_B : Αντίσταση κοχλία συνδέσεως τραβέρσας και στύλου

$R_{h,i}$, $R_{s,i}$, και $R_{r,i}$: Αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος του στύλου

$R_{h,CAi}$, $R_{s,CAi}$, και $R_{r,CAi}$: Αντιστάσεις της καρδιάς, φλοιού, και η ακτινική αντίσταση, του i -οστού βήματος της τραβέρσας

--Τρίτον, η αντίσταση του κοχλία συνδέσεως τραβέρσας και αντηρίδας R_B συνδέεται σε σειρά με την αντίσταση της αντηρίδας R_{st} αντί παραλλήλως.

Ας σημειωθεί ότι στο προτεινόμενο δίκτυο αντιστάσεων, 2 από τις 5 αντιστάσεις της τραβέρσας είναι ανοικτοκυκλωμένες, καθώς δεν υπάρχει ροή ρεύματος διαμέσου τους.

#Κατασκευή	Μέθοδος	I_{leak} (μΑ)	I_{sap} (μΑ)	I_{heart} (μΑ)	R_{con} (ΜΩ)	Αντίσταση Σφάλμα (%)	V_{pole} (%)	Τάση στύλου Σφάλμα (%)
1	Προτειν.	9151	8287	864	0,514	0,77	66,14	3,83
	Βιβλιογρ.	10395	9414	981	0,453	-12,72	75,13	17,94
2	Προτειν.	7124	6452	672	0,661	2,76	56,06	5,77
	Βιβλιογρ.	8656	7840	816	0,544	-18,15	68,36	28,98
3	Προτειν.	14688	13302	1386	0,320	12,28	100	0
	Βιβλιογρ.	14688	13302	1386	0,320	12,28	100	0
4	Προτειν.	13823	12518	1305	0,340	13,33	100	0
	Βιβλιογρ.	13544	12266	1278	0,347	15,67	100	0
5	Προτειν.	80,49	1,78	78,71	107,591	2,15	8,99	-11,86
	Βιβλιογρ.	118,73	3,02	115,71	72,939	-44,34	13,22	29,61
6	Προτειν.	49,82	1,16	48,66	173,826	3,21	6,05	-11,03
	Βιβλιογρ.	91,31	2,31	89	94,837	-77,40	11,06	62,65
7	Προτειν.	896	20,13	876	9,665	-9,96	100	0
	Βιβλιογρ.	899	23,41	876	9,633	-10,28	100	0
8	Προτειν.	824	21,01	803	10,510	-8,15	100	0
	Βιβλιογρ.	825	21,23	804	10,497	-8,27	100	0

Πίνακας 4.3.-1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με δίκτυα αντιστάσεων

I_{leak} :	Ρεύμα διαρροής
I_{heart} :	Ρεύμα ρέον διαμέσου της καρδιάς
I_{sap} :	Ρεύμα ρέον διαμέσου του φλοιού
R_{con} :	Φαινόμενη αντίσταση του στύλου
V_{pole} :	Επιβαλλόμενη τάση στον στύλο

Στον πίνακα 4.3.-1 δίνονται τα αποτελέσματα του προτεινόμενου δικτύου αντιστάσεων και του δικτύου αντιστάσεων κατά Wong et al. Ακόμη, θεωρώντας ως σωστά τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται η ποσοστιαία διαφορά.

4.4. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και των προσομοιώσεων με δίκτυα αντιστάσεων, η αντίσταση της κατασκευής στύλου-τραβέρσας μειώνεται σημαντικά όταν βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ξύλινης τραβέρσας και αντηρίδας (περίπτωση 1 και 5) η αντίσταση είναι μικρότερη κατά 206 φορές στην υγρή κατάσταση. Αντίστοιχα, στην περίπτωση μεταλλικής τραβέρσας και αντηρίδας (περίπτωση 3 και 7) η αντίσταση είναι μικρότερη κατά 37,7 φορές στην υγρή κατάσταση. Αξίζει να σημειωθεί πως, καθώς η αντίσταση της μεταλλικής τραβέρσας και αντηρίδας είναι αμελητέα, η αντίσταση του στύλου μειώνεται 37,7 φορές από την ξηρή στην υγρή κατάσταση.

Στην ξηρή κατάσταση το ρεύμα διαρροής οδεύει σε μεγάλο βαθμό από την καρδιά (98.1 %). Στην υγρή κατάσταση, το ρεύμα διαρροής, ως και 1,5 m από το έδαφος, οδεύει προσεγγιστικά κατά 2/3 από την καρδιά και κατά 1/3 από τον φλοιό. Κοντά στην βάση του στύλου, το ρεύμα διαρροής οδεύει στο μεγαλύτερο μέρος του από τον φλοιό (στην βάση 91,7 %). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την αγωγιμότητα του εμποτισμένου με C.C.A. φλοιού η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, κοντά στην βάση του στύλου όπου η περιεχόμενη υγρασία είναι αυξημένη, ο φλοιός παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση παρά τις μικρότερες διαστάσεις του.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να συναχθεί ότι η ξύλινη τραβέρσα συνιστά ένα μεγάλο μέρος της συνολικής αντίστασης της κατασκευής. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στις μικρές της διαστάσεις, συγκριτικά προς τον στύλο. Παραδείγματος χάριν, στην ξηρή κατάσταση χωρίς χιαστί (περίπτωση 6) η ξύλινη τραβέρσα αποτελεί το 93,2 % της συνολικής αντίστασης. Ακόμα, παρατηρείται πως η σχετική επίδρασή της είναι μικρότερη στην υγρή κατάσταση.

Η μεταλλική τραβέρσα μειώνει σημαντικά την ολική αντίσταση της κατασκευής καθώς αντικαθιστά την ξύλινη τραβέρσα. Παραδείγματος χάριν, στην ξηρή κατάσταση χωρίς χιαστί μειώνει την αντίσταση 14,7 φορές (περίπτωση 6 και 8). Η αντίστασή της μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα συγκριτικά προς την αντίσταση του στύλου. Η μέγιστη πτώση τάσης επί αυτής είναι της τάξεως του 0,5 % της εφαρμοζόμενης (περίπτωση 3). Αξίζει να σημειωθεί πως καθώς η μεταλλική τραβέρσα μειώνει την συνολική αντίσταση, όταν δημιουργούνται τόξα ανάμεσα στον

κοχλία και το μέταλλο, αυτά θα είναι πιο έντονα από αντίστοιχα τόξα ανάμεσα στον κοχλία και το ξύλο. Αυτό συμφωνεί με τις παρατηρήσεις στην [42].

Η ύπαρξη μεταλλικών χιαστί υποστηρίξεων της τραβέρσας μειώνει την συνολική αντίσταση από 5 έως 37,4 % (περιπτώσεις 3-4 και 5-6 αντίστοιχα). Η επίδρασή της είναι μεγαλύτερη στην ξηρή κατάσταση. Η μείωση της αντίστασης οφείλεται στο ότι γεφυρώνει μήκος της τραβέρσας και του στύλου (0,5 m από την τραβέρσα και ίδιο μήκος για τον στύλο). Η μεγάλη επίδραση των χιαστί μπορεί να εξηγηθεί καθώς γεφυρώνει την τραβέρσα και τον στύλο στο ύψος που έχει την μικρότερη διατομή. Ακόμα, αυξάνει την εφαρμοζόμενη επί του στύλου τάση.

Το δίκτυο αντιστάσεων του στύλου και της τραβέρσας και της μεταξύ τους διασύνδεσης που παρουσιάστηκε στην [45] δεν επιτυγχάνει καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, υποεκτιμά την αντίσταση της κατασκευής και δίνει μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής. Ακόμη, υποεκτιμά την επίδραση της τραβέρσας στην συνολική αντίσταση, όπως φαίνεται από την αυξημένη επιβαλλόμενη τάση στον στύλο (πίνακας 4.3.-1). Η υποεκτίμηση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από τις ακτινικές αντιστάσεις $R_{r,CA}$ οι οποίες μειώνουν την αντίσταση της τραβέρσας.

Το προτεινόμενο δίκτυο αντιστάσεων έχει αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνει την ροή του ρεύματος όπως προκύπτει από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, έχουν αφαιρεθεί οι ακτινικές αντιστάσεις καθώς κατά μήκος της τραβέρσας δεν υπάρχει ακτινική ροή του ρεύματος. Ακόμα, μέρος της αντίστασης του κοχλία σύνδεσης τραβέρσας-στύλου $R_{KB,2}$ γεφυρώνει την ακτινική αντίσταση ανάμεσα στην καρδιά και τον φλοιό του στύλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, στο ύψος του κοχλία η καρδιά και ο φλοιός είναι ισοδυναμικά συνδεδεμένες.

Το προτεινόμενο δίκτυο αντιστάσεων επιτυγχάνει μια καλή προσέγγιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα της αντίστασης είναι 3,21 % για την περίπτωση 6. Ας σημειωθεί πως σε όλες τις περιπτώσεις υπερεκτιμά την συνολική αντίσταση της κατασκευής. Ακόμα, στην υγρή κατάσταση υποεκτιμά την σχετική αντίσταση της τραβέρσας (περιπτώσεις 1 και 2). Αντιθέτως, στην ξηρή κατάσταση, υπερεκτιμά την σχετική αντίσταση της τραβέρσας.

5. Ροή φορτίου συστημάτων διανομής με κομμένο πολλαπλά-γειωμένο ουδέτερο

Συνήθως χρησιμοποιούμενα συστήματα γειώσεως σε δίκτυα διανομής προς οικιακούς καταναλωτές είναι η ουδετερογείωση και η άμεση γείωση (συστήματα γειώσεως TN-C-S PME και TT αντίστοιχα κατά IEC - 60364 [85]). Η γείωση του ουδετέρου σε τακτά διαστήματα γίνεται ως προστασία έναντι της αποκοπής του ουδετέρου. Στα δίκτυα με άμεση γείωση, ο ουδέτερος είναι γειωμένος μόνο σε ένα σημείο. Ωστόσο, υπάρχει σκέψη για την μετατροπή των δικτύων με άμεση γείωση (TT) σε δίκτυα με ουδετερογείωση (TN) [86]. Ένας εκ των λόγων για την μετατροπή αυτή, είναι η μικρότερη αντίσταση σφάλματος προς γη στα δίκτυα με ουδετερογείωση [32].

Τα ρεύματα επιστροφής μπορεί να πάρουν σημαντικές τιμές εξ αιτίας της ασυμμετρίας της φόρτισης των φάσεων και των ομοπολικών αρμονικών των φορτίων [87, 88]. Χαρακτηριστικά, ο Stojanovic et al στην [89] σε μετρήσεις σε υποσταθμούς μέσης προς χαμηλή τάση αναφέρει ότι το ρεύμα του ουδετέρου έφτασε έως και 66,85% της μέσης φόρτισης των φάσεων. Πρέπει να σημειωθεί πως η ροή του ρεύματος επιστροφής σε πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο δεν είναι συνεχής εξ αιτίας του συστήματος γειώσεως [90].

Παρά την "κατανεμημένη" γείωση των δικτύων με ουδετερογείωση, η αποκοπή του ουδετέρου μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές των εγκαταστάσεων των καταναλωτών. Αιτία αυτού είναι τα σημαντικά ρεύματα επιστροφής σε συνδυασμό με την αντίσταση του δρόμου επιστροφής. Στην συνέχεια θα αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος ροής φορτίου για δίκτυα διανομής, με ουδετερογείωση, με κομμένο ουδέτερο. Η περίπτωση αυτή, δεν έχει αντιμετωπιστεί στην βιβλιογραφία.

Η εμπρόσθια-οπίσθια τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση ροής φορτίων ασύμμετρων δικτύων διανομής [32, 91-93]. Συγκεκριμένα, ο Ciric et al, στην [32], παρουσίασε την δυνατότητα ενσωμάτωσης του ουδετέρου αγωγού και του ισοδύναμου αγωγού γης. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην εμπρόσθια-οπίσθια μέθοδο. Η ροή του ρεύματος επιστροφής βρίσκεται μέσω ανάλυσης του δικτύου του κομμένου ουδετέρου, αγωγού γης, και των ηλεκτροδίων γειώσεως.

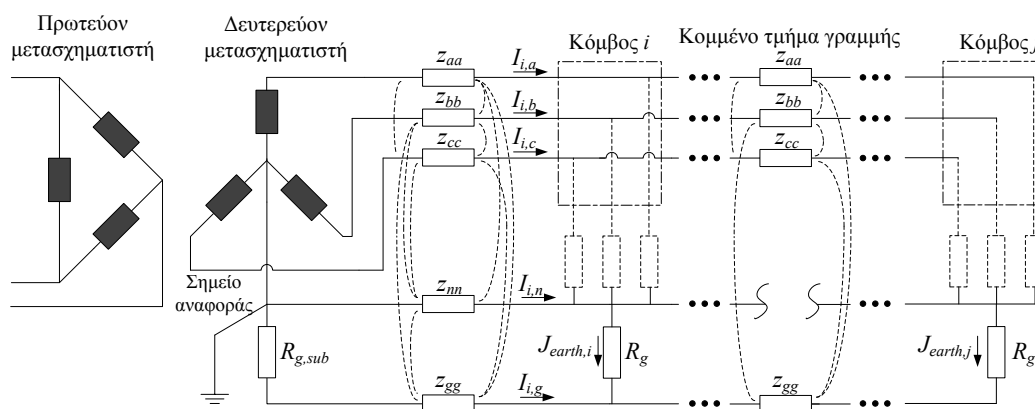
5.1. Προτεινόμενος αλγόριθμος

Καθώς τα ρεύματα επιστροφής μπορούν να έχουν σημαντικές αρμονικές συνιστώσες, το σύστημα πρέπει να επιλυθεί για ένα εύρος συχνοτήτων. Στην παρούσα υλοποίηση, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για την θεμελιώδη και τρίτη αρμονική. Ωστόσο, η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί για οιαδήποτε τάξη αρμονικής.

Ο πίνακας αντιστάσεων της αρμονικής τάξεως h σε δίκτυο 4-αγωγών με πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο ανάμεσα σε δυο κόμβους είναι διαστάσεως 5×5 . Η σύνθετη αντίσταση σειράς των αγωγών φάσεων και ουδετέρου προκύπτει από την ανάλυση του [29] για τις πρωτογενείς αντιστάσεις. Η αντίσταση του ισοδύναμου αγωγού γης υπολογίζεται όπως στην [32], στην περίπτωση εναέριας γραμμής. Στην περίπτωση υπογείων καλωδίων, η αντίσταση του ισοδύναμου αγωγού γης υπολογίζεται από την επίλυση των ολοκληρωμάτων Pollaczek [33]. Στην περίπτωση κομμένου ουδετέρου, η τέταρτη γραμμή και στήλη του πίνακα θεωρούνται άπειρες.

Ο αρχικός κόμβος θεωρείται ως ο κόμβος αναφοράς. Οι τάσεις των φάσεων και του ουδετέρου είναι σταθερές κατά μέτρο και γωνία, ενώ η τάση της γης εξαρτάται από το ρεύμα που επιστρέφει διαμέσου του ισοδύναμου αγωγού γης.

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο του δικτύου 4-αγωγών με πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο, σε κατάσταση ανοικτού ουδετέρου φαίνεται στο σχήμα 5.1.-1.



Σχήμα 5.1.-1: Μοντέλο δικτύου 4-αγωγών με κομμένο πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο

R_g : Αντίσταση ηλεκτροδίου γειώσεως

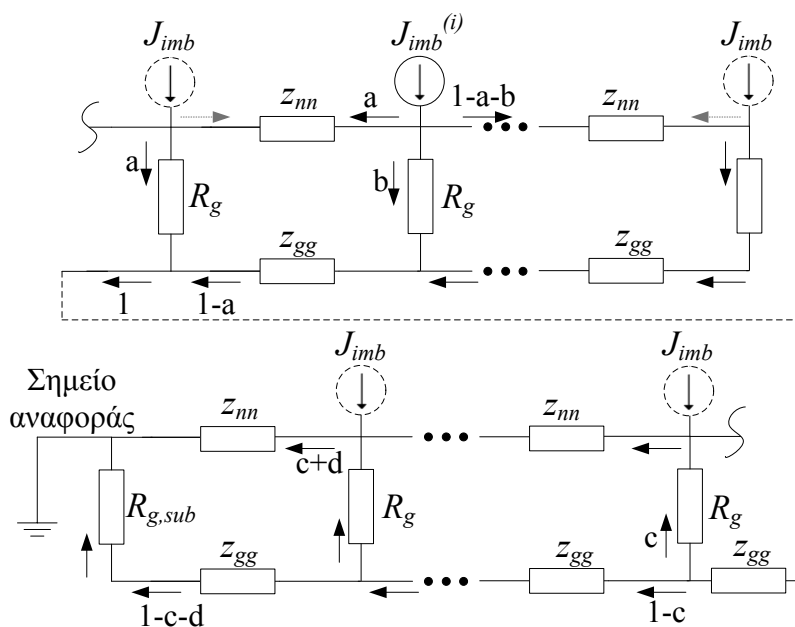
$J_{earth,i}$: Ρεύμα στο ηλεκτρόδιο γειώσεως του κόμβου i

z_{ij} : Στοιχείο του πίνακα αντιστάσεων σειράς (1.3.1.-1)

I_i : Ρεύμα αγωγών φάσεως, ουδετέρου, και γης

5.1.1. Μοντελοποίηση δρόμου επιστροφής

Το ρεύμα επιστροφής (το οποίο προκύπτει εξαιτίας της ασυμμετρίας του φορτίου και των ομοπολικών αρμονικών), στην περίπτωση του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου, ρέει μέσω του ουδετέρου και της γης. Ο ουδέτερος, ο ισοδύναμος αγωγός γείωσης, και οι γειώσεις σχηματίζουν ένα δίκτυο συνθέτων αντιστάσεων και εξαρτώμενων πηγών τάσεως (επαγόμενες τάσεις από ροή ρεύματος σε άλλους αγωγούς). Ωστόσο, οι τάσεις αυτές μπορούν να αμεληθούν για τον υπολογισμό της ροής των ρευμάτων επιστροφής. Στο δίκτυο αυτό, εγχέονται ρεύματα από όλους τους κόμβους στους οποίους το φορτίο παρουσιάζει ασυμμετρία. Παράδειγμα τέτοιου δικτύου, φαίνεται στο σχήμα 5.1.1.-1.



Σχήμα 5.1.1.-1: Δίκτυο γειώσεων μιας γραμμής χαμηλής τάσης, κατάντη του σημείου αποκοπής του ουδετέρου

R_g : Αντίσταση ηλεκτροδίου γειώσεως

$J_{imb}^{(i)}$: Ρεύμα επιστροφής εξαιτίας του κόμβου i

z_{ij} : Στοιχείο του πίνακα αντιστάσεων σειράς (1.3.1.-1)

Το δίκτυο των γειώσεων μπορεί να χωριστεί σε δυο μέρη: κατάντη και ανάντη του σημείου αποκοπής. Τα ρεύματα επιστροφής, τα οποία εγχέονται κατάντη του σημείου

αποκοπής, διαμοιράζονται στις γειώσεις του δικτύου κατάντη του σημείου αποκοπής με φορά προς τον ισοδύναμο αγωγό γης, και στην συνέχεια διαμοιράζονται εκ νέου στις γειώσεις ανάντη του σημείου αποκοπής με φορά προς τον αγωγό ουδέτερου (σχήμα 5.1.1.-1).

Στην συνέχεια, ο καταμερισμός των ρευμάτων επιστροφής στο δίκτυο γειώσεων βρίσκεται με εφαρμογή του νόμου ρεύματος του Kirchhoff. Η ανάλυση αυτή πρέπει να επαναληφθεί για κάθε κόμβο που εγγχεί ρεύμα επιστροφής. Αποτέλεσμα αυτής της αναλύσεως είναι μια στήλη συντελεστών για τις γειώσεις και ένας πίνακας συντελεστών για τα τμήματα της γραμμής, για κάθε κόμβο (στο σχήμα 5.1.1.-1 φαίνονται οι συντελεστές a , b , c , και d για τον κόμβο i). Η στήλη συντελεστών για τις γειώσεις έχει μέγεθος ίσο προς τον αριθμό των κόμβων (αν ο ουδέτερος του κόμβου δεν γειώνεται ο συντελεστής είναι ίσος προς μηδέν). Ο πίνακας συντελεστών για τα τμήματα της γραμμής έχει μέγεθος ίσο προς $2 \times$ αριθμός τμημάτων γραμμής (ο συντελεστής για τον κομμένο ουδέτερο είναι μηδέν).

5.1.2. Επαναληπτικός βρόγχος

Κατά την επανάληψη k .

α) Υπολογισμός εγχύσεων ρευμάτων

Οι εγχύσεις ρεύματος, στον κόμβο i , για τις τρεις φάσεις και την θεμελιώδη αρμονική ($h = 1$) υπολογίζονται σύμφωνα με την (5.1.2.-1).

$$\begin{bmatrix} J_{i,a} \\ J_{i,b} \\ J_{i,c} \end{bmatrix}^{(1),k} = \begin{bmatrix} I_{Li,a} \\ I_{Li,b} \\ I_{Li,c} \end{bmatrix}^{(1),k} + \begin{bmatrix} I_{shi,a} \\ I_{shi,b} \\ I_{shi,c} \end{bmatrix}^{(1),k} + \begin{bmatrix} I_{capi,a} \\ I_{capi,b} \\ I_{capi,c} \end{bmatrix}^{(1),k} \quad (5.1.2.-1)$$

όπου $J_{i,a}$, $J_{i,b}$, και $J_{i,c}$ είναι οι εγχύσεις για τις φάσεις a , b , και c , αντιστοίχως, $I_{Li,a}$, $I_{Li,b}$, και $I_{Li,c}$ είναι τα ρεύματα γραμμής των φορτίων (σταθερής ισχύος, αντίστασης, ρεύματος, ή συνδυασμός αυτών) συνδεδεμένων στον κόμβο, $I_{shi,a}$, $I_{shi,b}$, και $I_{shi,c}$ είναι τα ρεύματα φόρτισης της γραμμής, $I_{capi,a}$, $I_{capi,b}$, και $I_{capi,c}$ είναι τα ρεύματα φόρτισης των συστοιχιών πυκνωτών συνδεδεμένων στον κόμβο, και $V_{i,a}$, $V_{i,b}$, $V_{i,c}$, και $V_{i,n}$ είναι οι τάσεις του κόμβου. Τα ρεύματα των φορτίων υπολογίζονται όπως στην [94].

Φορτία συνδεδεμένα σε αστέρα υπόκεινται σε τάση φάση-προς-ουδέτερο, δηλαδή $V_{i,x}$ - $V_{i,n}$, και φορτία σε τρίγωνο υπόκεινται σε πολική τάση. Οι διαγώνιες εγκάρσιες αγωγιμότητες $Y_{i,a}$, $Y_{i,b}$, και $Y_{i,c}$ της γραμμής υπόκεινται σε τάση φάση-προς-γη, δηλαδή $V_{i,x}$ - $V_{i,g}$.

Τα μη γραμμικά φορτία αντιμετωπίζονται ως πηγές ρεύματος [93]. Ο υπολογισμός των εγχύσεων ρευμάτων γίνεται ως:

$$\begin{bmatrix} J_{i,a} \\ J_{i,b} \\ J_{i,c} \end{bmatrix}^{(h),k} = \begin{bmatrix} I_{hi,a} \\ I_{hi,b} \\ I_{hi,c} \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} I_{shi,a} \\ I_{shi,b} \\ I_{shi,c} \end{bmatrix}^{(h),k} + \begin{bmatrix} I_{capi,a} \\ I_{capi,b} \\ I_{capi,c} \end{bmatrix}^{(h),k} \quad (5.1.2.-2)$$

όπου $I_{hi,a}$, $I_{hi,b}$, και $I_{hi,c}$ είναι οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος εξ αιτίας των μη γραμμικών φορτίων.

β) Πέρασμα προς τα όπισθεν - υπολογισμός ρευμάτων φάσεων

Τα ρεύματα των αγωγών φάσεων ανάμεσα στους κόμβους i και j (τμήμα γραμμής l) υπολογίζονται σύμφωνα με την (5.1.2.-3) [32]. Ο τρόπος υπολογισμού των ρευμάτων του ουδετέρου και του ισοδύναμου αγωγού γης παρουσιάζεται αργότερα καθώς διαφέρει της (5.1.2.-3) εξ αιτίας της ασυνέχειας του ουδετέρου.

$$\begin{bmatrix} I_{l,a} \\ I_{l,b} \\ I_{l,c} \end{bmatrix}^{(h),k} = - \begin{bmatrix} J_{j,a} \\ J_{j,b} \\ J_{j,c} \end{bmatrix}^{(h),k} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} I_{m,a} \\ I_{m,b} \\ I_{m,c} \end{bmatrix}^{(h),k} \quad (5.1.2.-3)$$

όπου $I_{l,a}$, $I_{l,b}$, και $I_{l,c}$ τα ρεύματα στο τμήμα γραμμής l , και M το σύνολο των κατάντη κόμβων, συνδεδεμένων στον κόμβο j .

γ) Υπολογισμός ρευμάτων ουδετέρου και ισοδύναμου αγωγού γης

Τα ρεύματα στον ουδέτερο και στον ισοδύναμο αγωγό γης μπορούν να υπολογισθούν με την (5.1.2.-4).

$$\begin{bmatrix} I_{l,n} \\ I_{l,g} \end{bmatrix}^{(h),k} = \sum_{m \in S} \begin{bmatrix} f_{n,l} \\ f_{g,l} \end{bmatrix}_m^{(h)} J_{imb,m}^{(h),k} \quad (5.1.2.-4)$$

όπου $I_{l,n}$ και $I_{l,g}$ είναι τα ρεύματα ουδετέρου και ισοδύναμου αγωγού γης, αντίστοιχα, στο τμήμα γραμμής l , $f_{n,l}$ και $f_{g,l}$ είναι οι συντελεστές για το τμήμα γραμμής l , S είναι το σύνολο των κόμβων, και $J_{imb,m}^{(h),k}$ είναι το ρεύμα επιστροφής το οποίο οφείλεται στον κόμβο m . Το ρεύμα $J_{imb,m}^{(h),k}$ προκύπτει από το άθροισμα των εγχύσεων των τριών φάσεων στον κόμβο m .

δ) Πέρασμα προς τα εμπρός - υπολογισμός των τάσεων

Ξεκινώντας από τον κόμβο αναφοράς, οι τάσεις των κόμβων μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_{j,a} \\ V_{j,b} \\ V_{j,c} \\ V_{j,n} \\ V_{j,g} \end{bmatrix}^{(h),k} = \begin{bmatrix} V_{i,a} \\ V_{i,b} \\ V_{i,c} \\ V_{i,n} \\ V_{i,g} \end{bmatrix}^{(h),k} - \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{an} & \bar{z}_{ag} \\ \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{bn} & \bar{z}_{bg} \\ \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{cc} & \bar{z}_{cn} & \bar{z}_{cg} \\ \bar{z}_{an} & \bar{z}_{bn} & \bar{z}_{cn} & \bar{z}_{nn} & \bar{z}_{ng} \\ \bar{z}_{ag} & \bar{z}_{bg} & \bar{z}_{cg} & \bar{z}_{ng} & \bar{z}_{gg} \end{bmatrix}^{(h)} \begin{bmatrix} I_{l,a} \\ I_{l,b} \\ I_{l,c} \\ -I_{l,n} \\ -I_{l,g} \end{bmatrix}^{(h),k} \quad (5.1.2.-5)$$

Το αρνητικό πρόσημο των ρευμάτων ουδετέρου και ισοδύναμου αγωγού γης οφείλεται στην φορά των ρευμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.-1. Ας σημειωθεί ότι για το τμήμα της γραμμής που περιέχει τον κομμένο ουδέτερο, η υπολογισθείσα τάση ουδετέρου (του κόμβου κατάντη του σημείου αποκοπής) απορρίπτεται. Η τιμή της τάσης του ουδετέρου στον κόμβο αυτό βρίσκεται από την (5.1.2.-8) στην περίπτωση που είναι γειωμένος. Αν ο ουδέτερος δεν είναι γειωμένος σε αυτόν τον κόμβο, χρησιμοποιείται η τιμή της τάσεως του αμέσως επομένου γειωμένου κόμβου.

ε) Υπολογισμός ρευμάτων στις γειώσεις και διόρθωση τάσεων

Με παρόμοιο τρόπο προς την (5.1.2.-4), τα ρεύματα των γειώσεων υπολογίζονται ως εξής:

$$J_{earth,i}^{(h),k} = \sum_{m \in S} g_{i,m}^{(h)} J_{imb,m}^{(h),k} \quad (5.1.2.-6)$$

όπου $J_{earth,i}^{(h),k}$ είναι το ρεύμα στο ηλεκτρόδιο γείωσης του κόμβου i , και $g_{i,m}^{(h)}$ είναι ο συντελεστής του ρεύματος επιστροφής από τον κόμβο m για το ηλεκτρόδιο γείωσης στο κόμβο i .

Η διόρθωση των τάσεων στους κόμβους στους οποίους γειώνεται ο ουδέτερος επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της (5.1.2.-7) για τους κόμβους ανάντη και της (5.1.2.-8) για τους κόμβους κατόντη του σημείου αποκοπής του ουδετέρου.

$$V_{g,i}^{(h),k} = V_{n,i}^{(h),k} - J_{earth,i}^{(h),k} R_{g,i} \quad (5.1.2.-7)$$

$$V_{n,i}^{(h),k} = V_{g,i}^{(h),k} + J_{earth,i}^{(h),k} R_{g,i} \quad (5.1.2.-8)$$

όπου $R_{g,i}$ η αντίσταση της γείωσης του κόμβου i .

στ) Έλεγχος σύγκλισης

Στο τέλος του βρόχου ελέγχονται οι διαφορές των τάσεων σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη και αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 0,0001, ο βρόχος επαναλαμβάνεται.

Άλλα στοιχεία του δικτύου διανομής (όπως μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο, συστοιχίες πυκνωτών, κτλ.) μπορούν να ενσωματωθούν στον προτεινόμενο αλγόριθμο.

5.2. Εφαρμογή του αλγορίθμου

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε τρία διαφορετικά δίκτυα διανομής, και συγκεκριμένα:

- μια γραμμή διανομής χαμηλής τάσεως 13 κόμβων, πολικής τάσεως 0,4 kV (περίπτωση A)
- το πρότυπο δίκτυο κατά IEEE για την ανάλυση τάσεων ουδετέρου προς γη (IEEE Neutral-to Earth Voltage test feeder), πολικής τάσεως 13,2 kV (περίπτωση B) [95, 96]

- η πρότυπη γραμμή κατά IEEE για την ανάλυση τάσεων ουδέτερου προς γη (IEEE single-circuit Neutral-to Earth Voltage test feeder), πολικής τάσεως 12,47 kV (περίπτωση Γ) [97]

Σε κάθε περίπτωση, ο ουδέτερος θεωρείται πολλαπλά γειωμένος (PME δίκτυο). Η ειδική αντίσταση του εδάφους θεωρείται ίση προς 100 Ωm, εκτός αν μεταβάλλεται.

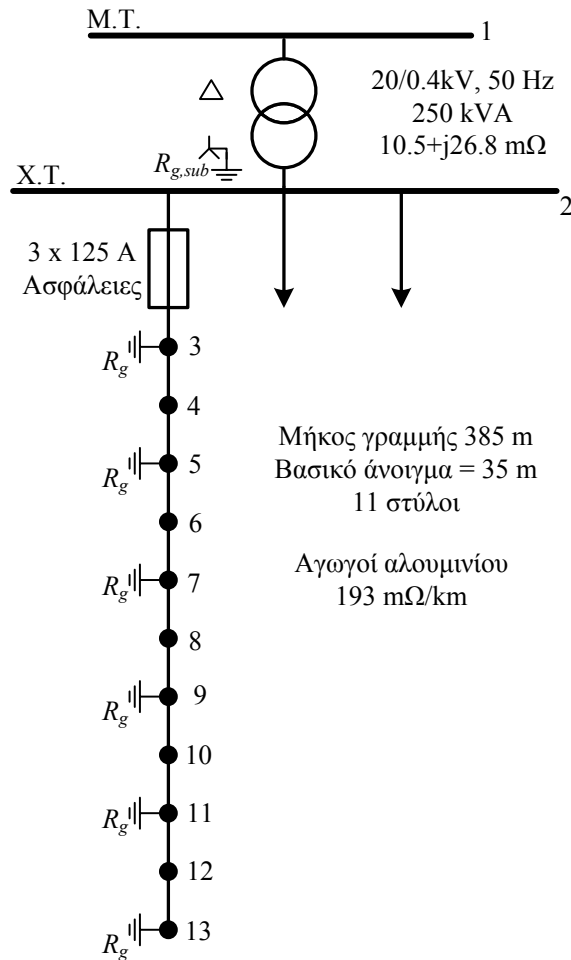
Η γραμμή χαμηλής τάσεως είναι μια πραγματική γραμμή 4 αγωγών (συστήματος γειώσεως TN-C-S PME κατά IEC), η οποία υπέστη αποκοπή του ουδέτερου με αποτέλεσμα σημαντικές ζημίες στις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Αποτελείτο από 4 αγωγούς αλουμινίου, ισοδύναμης διατομής χαλκού 95 mm², σε κάθετη διάταξη. Ο ουδέτερος ήταν γειωμένος στον υποσταθμό και σε κάθε δεύτερο στύλο. Επιπλέον, οι γειώσεις των εγκαταστάσεων των καταναλωτών ήταν συνδεδεμένες παράλληλα. Οι αντιστάσεις των ηλεκτροδίων των γειώσεων θεωρούνται ίσες προς 1, 10, και 5 Ω για τον υποσταθμό, στύλους, και εγκαταστάσεις καταναλωτών αντίστοιχα, εκτός αν μεταβάλλονται ως παράμετρος. Η γραμμή φαίνεται στο σχήμα 5.2.-1. Η φόρτιση της γραμμής φαίνεται στον πίνακα 5.2.-1. Η τρίτη αρμονική συνιστώσα του φορτίου θεωρείται ίση προς το 10% της φόρτισης στην θεμελιώδη συχνότητα.

Κόμβος	P_A (W)	Q_A (VAr)	P_B (W)	Q_B (VAr)	P_C (W)	Q_C (VAr)
4	2541.8	1575.3	106.5	66.0	1192.8	739.3
5	2479.6	1536.7	493.1	305.6	701.9	435.0
6	2351.9	1457.6	2031.1	1258.8	4150.3	2572.1
7	2899.2	1796.7	622.4	385.7	535.5	331.9
9	537.2	332.9	0.0	0.0	3634.2	2252.3
10	63.3	39.2	1457.4	903.2	158.9	98.5
11	3994.8	2475.8	1255.7	778.2	2722.8	1687.5
13	0.0	0.0	0.0	0.0	1413.6	876.1
Σύνολο	14867.8	9214.2	5966.2	3697.5	14510.0	8992.5

Πίνακας 5.2.-1: Φόρτιση της γραμμής χαμηλής τάσεως στην θεμελιώδη συχνότητα (περίπτωση Α)

P_i : Ενεργός φόρτιση της φάσης i

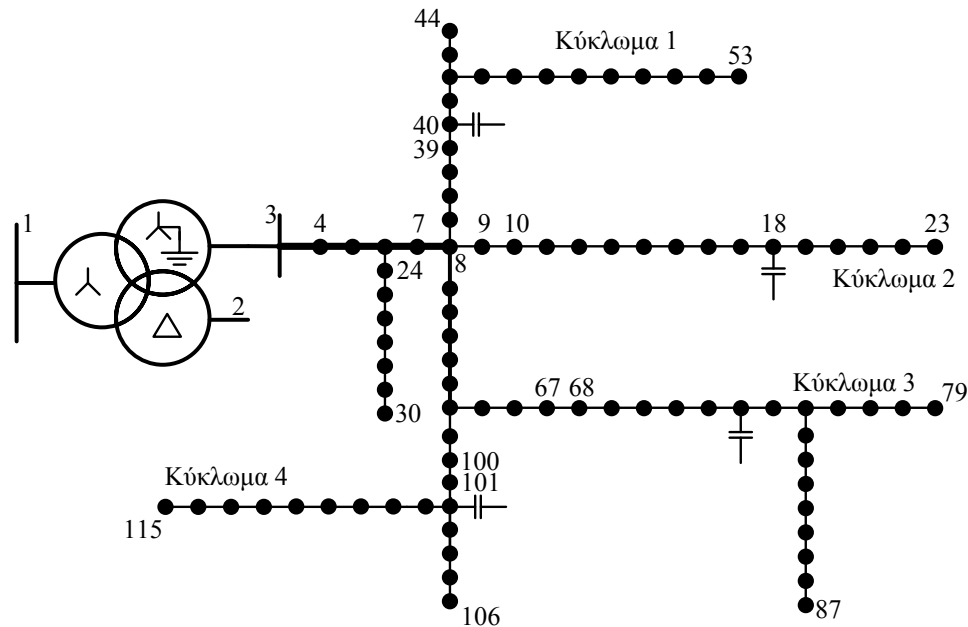
Q_i : Άεργος φόρτιση της φάσης i



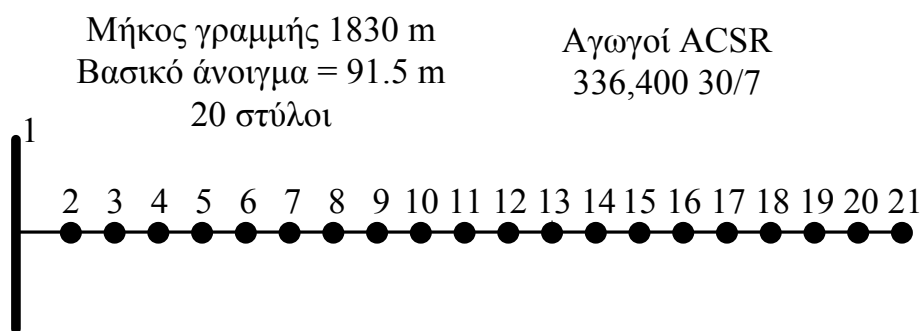
Σχήμα 5.2.-1: Η γραμμή διανομής χαμηλής τάσεως (περίπτωση Α)

Στην περίπτωση Β (η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.2.-2), παραλήφθηκαν τα τηλεπικοινωνιακά καλώδια, καθώς σε περίπτωση αποκοπής του ουδετέρου θα δρούσαν ως υποκατάστατό του. Η αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης θεωρείται ίση προς 2, και 100 Ω για τον υποσταθμό, τους στύλους και τους καταναλωτές, αντίστοιχα. Η αυτεπαγωγή του ηλεκτροδίου θεωρείται ίση προς 12 μΗ [95]. Τα φορτία θεωρούνται ως φορτία σταθερής ισχύος. Επιπροσθέτως, μελετάται η επίδραση της γειώσεως του υποσταθμού μέσω πηνίου. Για λόγους απλοποίησης του δικτύου, οι μετασχηματιστές υποβιβασμού αντικαθίστανται με ισοδύναμα μήκη γραμμής. Στύλοι οι οποίοι μοιράζονται από πολλαπλά κυκλώματα αντιστοιχούν σε αριθμό κόμβων ίσο προς τον αριθμό των κυκλωμάτων (π.χ. οι κόμβοι 4, 31, 54, και 88 βρίσκονται στον πρώτο στύλο κατάντη του υποσταθμού).

Ομοίως, στην περίπτωση Γ (η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.2.-3), η αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης θεωρείται ίση προς 2, και 10 Ω για τον υποσταθμό, και τους στύλους, αντίστοιχα, εκτός αν μεταβάλλεται ως παράμετρος. Ας σημειωθεί ότι όλοι οι στύλοι είναι γειωμένοι.



Σχήμα 5.2.-2: Το πρότυπο δίκτυο κατά IEEE για την ανάλυση τάσεων ουδετέρου προς γη (περίπτωση Β)



Σχήμα 5.2.-3: Η πρότυπη γραμμή κατά IEEE για την ανάλυση τάσεων ουδετέρου προς γη (περίπτωση Γ)

Το αρχικό βήμα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ο υπολογισμός των συντελεστών διαίρεσης του ρεύματος επιστροφής, για κάθε συχνότητα και κάθε

κόμβο. Παραδείγματος χάριν, οι συντελεστές για τον κόμβο 11 και την τρίτη αρμονική, όταν η αποκοπή του ουδετέρου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 7 και 8, φαίνονται στον πίνακα 5.2.-2 (περίπτωση Α).

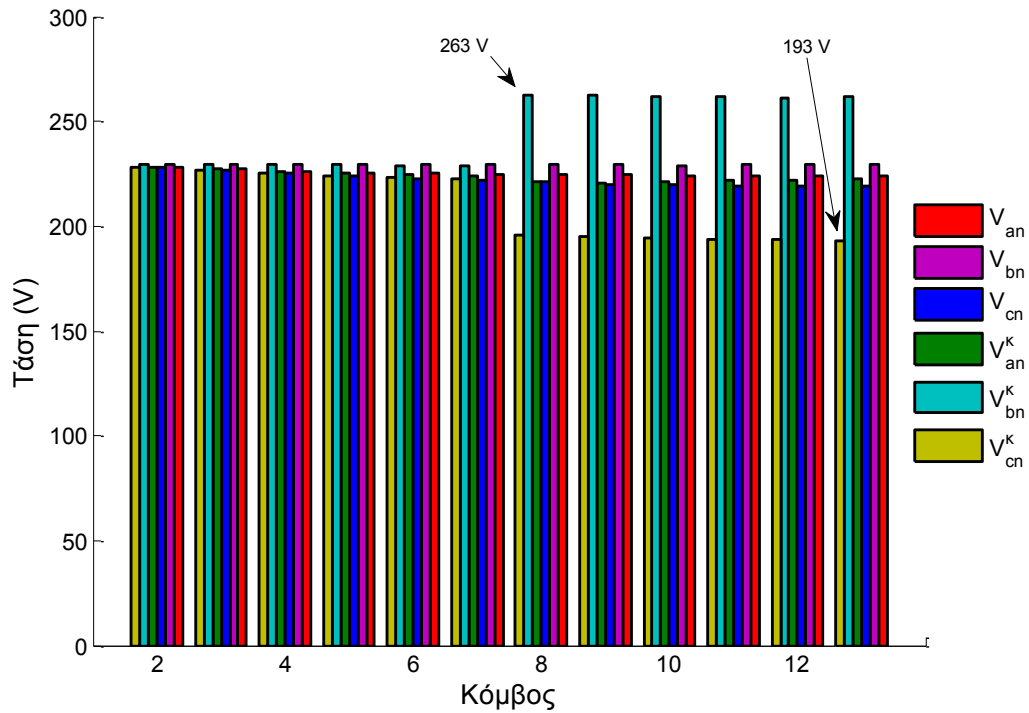
Ορισμένα αποτελέσματα για την περίπτωση Α δίνονται στα σχήματα 5.2.-4 έως 5.2.-7. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.2.-4 φαίνονται τα επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της θεμελιώδους συνιστώσας, όταν η αποκοπή του ουδετέρου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 7 και 8, σε σχέση με τα επίπεδα τάσεων της γραμμής χωρίς αποκοπή. Τα φορτία θεωρούνται φορτία σταθερής ισχύος. Στο σχήμα 5.2.-5 φαίνεται η 3^η αρμονική συνιστώσα των επιπέδων τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο. Στο σχήμα 5.2.-6 φαίνεται η επίδραση της αυξήσεως κατά 50% των αντιστάσεων των ηλεκτροδίων γείωσης για φορτία σταθερής ισχύος και φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Τελικώς, στο σχήμα 5.2.-7 φαίνονται τα επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της θεμελιώδους συνιστώσας, όταν η αποκοπή του ουδετέρου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 4 και 5, και 11 και 12.

Κόμβος	$g_{i,11}$		Τμήμα γραμμής	$f_{n,11}$		$f_{g,11}$	
	Μέτρο	Γωνία (°)		Μέτρο.	Γωνία (°)	Μέτρο.	Γωνία (°)
2	0.3208	-172.04	2-3	0.6837	-3.73	0.3208	7.96
3	0.1538	-179.44	3-4	0.5305	-4.97	0.4738	5.57
4	0.0600	176.12	4-5	0.4704	-5.11	0.5331	4.51
5	0.2066	172.87	5-6	0.2641	-3.53	0.7366	1.27
6	0.0587	174.30	6-7	0.2054	-2.91	0.7949	0.75
7	0.2054	177.09	7-8	0.0000	0.00	1.0000	0.00
8	0.0000	0.00	8-9	0.0000	0.00	1.0000	0.00
9	0.3094	2.17	9-10	0.3094	2.17	0.6909	-0.97
10	0.0880	1.97	10-11	0.3974	2.13	0.6031	-1.40
11	0.3076	3.11	11-12	0.2974	173.93	0.2974	-6.07
12	0.0000	0.00	12-13	0.2974	173.93	0.2974	-6.07
13	0.2974	-6.07		-	-	-	-

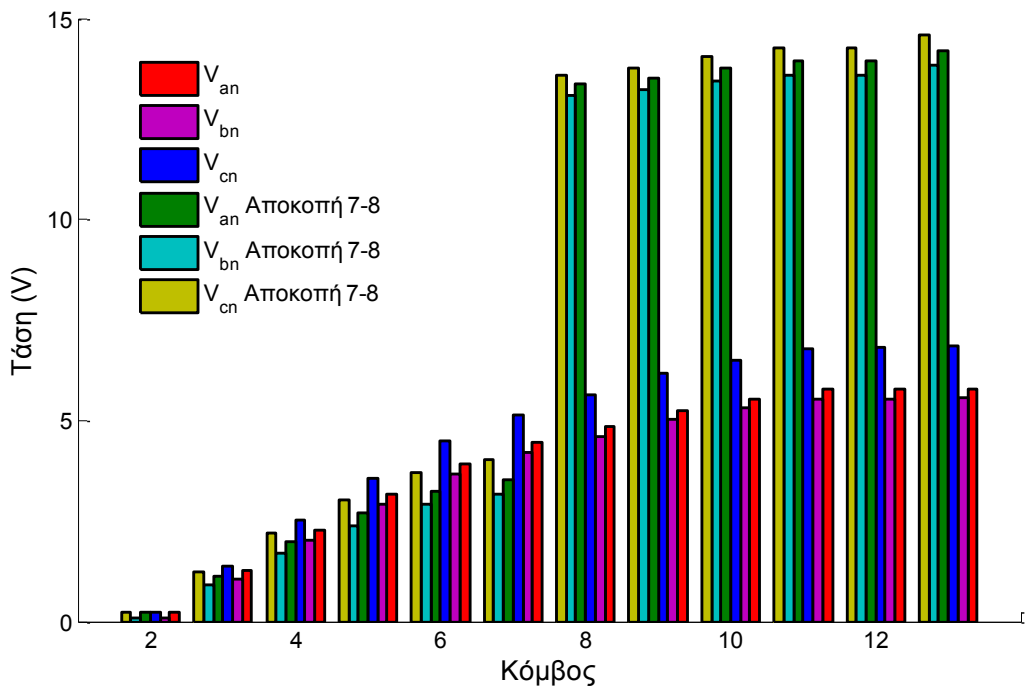
Πίνακας 5.2.-2: Συντελεστές περιγράφοντες την διαίρεση του ρεύματος επιστροφής (περίπτωση Α)

$g_{i,11}$: Ο συντελεστής του ρεύματος επιστροφής από τον κόμβο i για το ηλεκτρόδιο γείωσης στο κόμβο 11

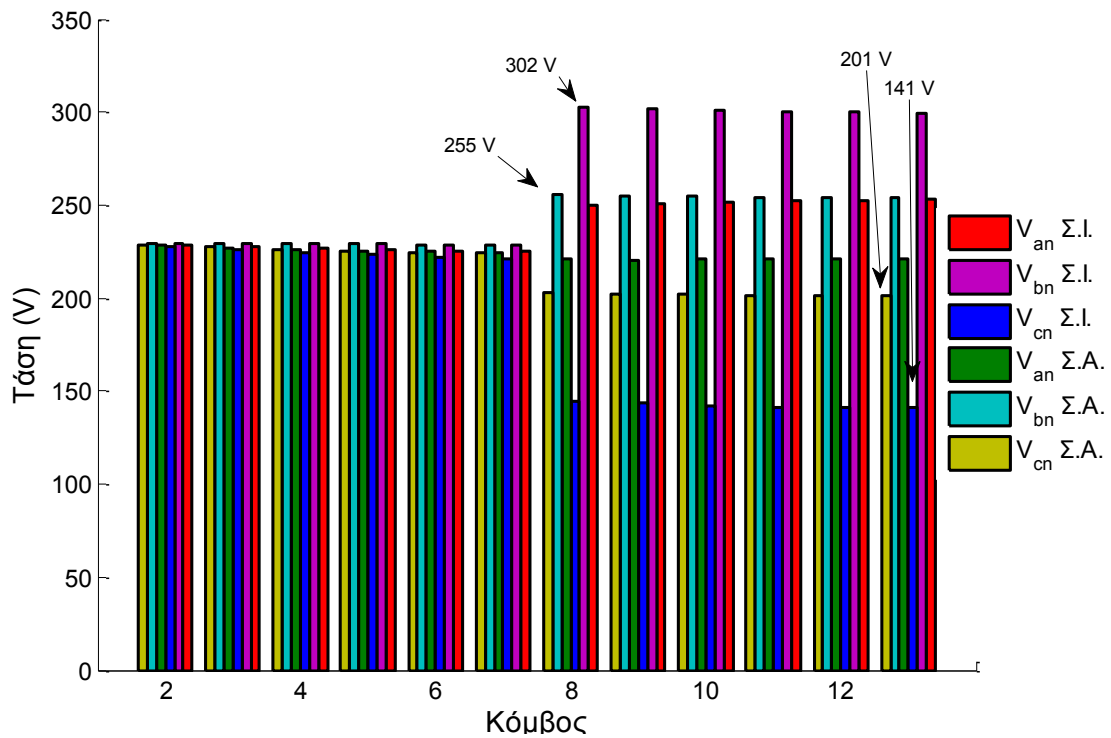
$f_{n,l}$ και $f_{g,l}$: Οι συντελεστές για το τμήμα γραμμής l



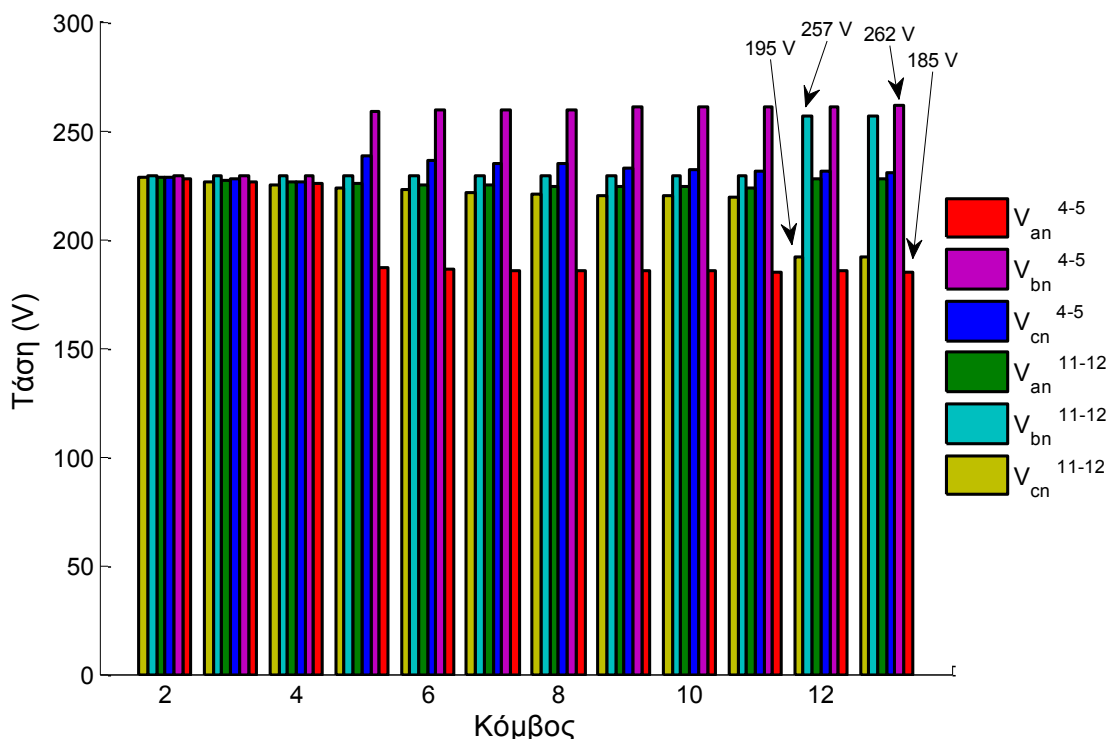
Σχήμα 5.2.-4: Επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της θεμελιώδους συνιστώσας, όταν η αποκοπή του ουδέτερου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 7 και 8, συγκρινόμενα με επίπεδα τάσεων γραμμής χωρίς σφάλμα. Φορτία σταθερής ισχύος.



Σχήμα 5.2.-5: Επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της 3^{ης} αρμονικής, όταν η αποκοπή του ουδέτερου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 7 και 8, συγκρινόμενα με επίπεδα τάσεων γραμμής χωρίς σφάλμα. Φορτία σταθερής ισχύος.



Σχήμα 5.2.-6: Επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της θεμελιώδους συνιστώσας, όταν η αποκοπή του ουδετέρου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 7 και 8. Φορτία σταθερής ισχύος (Σ.Ι.) και αγωγιμότητας (Σ.Α.).



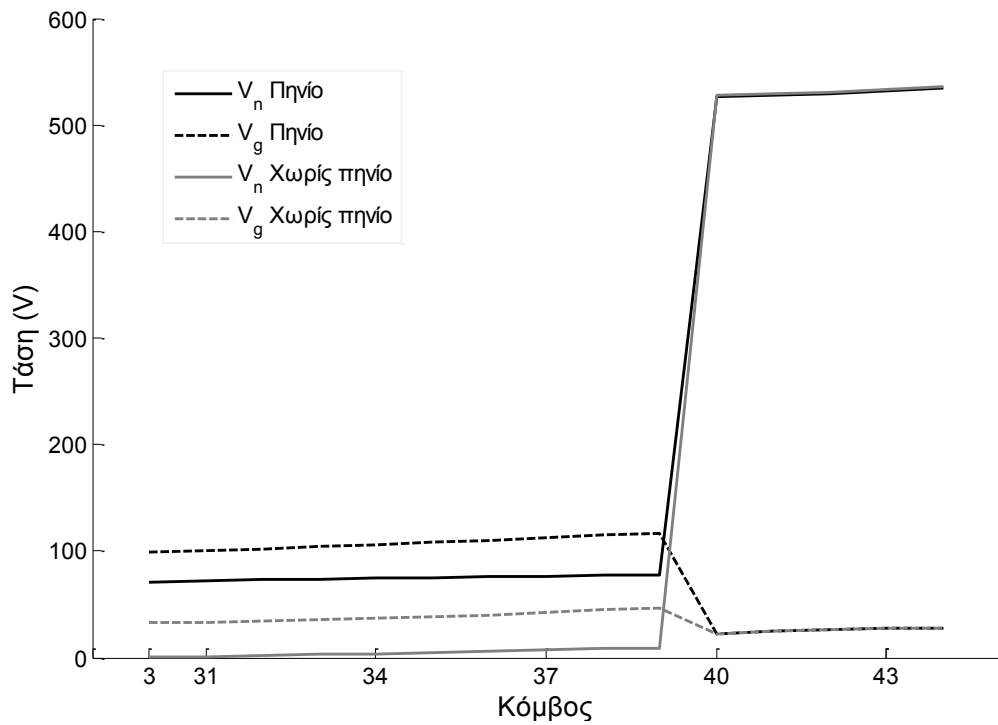
Σχήμα 5.2.-7: Επίπεδα τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της θεμελιώδους αρμονικής, όταν η αποκοπή του ουδετέρου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 4 και 5, και 11 και 12. Φορτία σταθερής ισχύος.

Στον πίνακα 5.2.-3 φαίνονται τα επίπεδα τάσεως του ουδετέρου, στους κόμβους οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με φορτία, για την περίπτωση Β. Ακόμα, η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσεως του ουδετέρου και της γης, κατά μήκος του κυκλώματος 1 (κόμβοι 31 έως 44), φαίνεται στο σχήμα 5.2-8. Ο ουδέτερος θεωρείται ότι έχει αποκοπεί ανάμεσα στους κόμβους 39 και 40. Η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στα επίπεδα τάσεως του ισοδύναμου αγωγού γης φαίνεται στο σχήμα 5.2-9, όταν ο ουδέτερος έχει αποκοπεί ανάμεσα στους κόμβους 100 και 101.

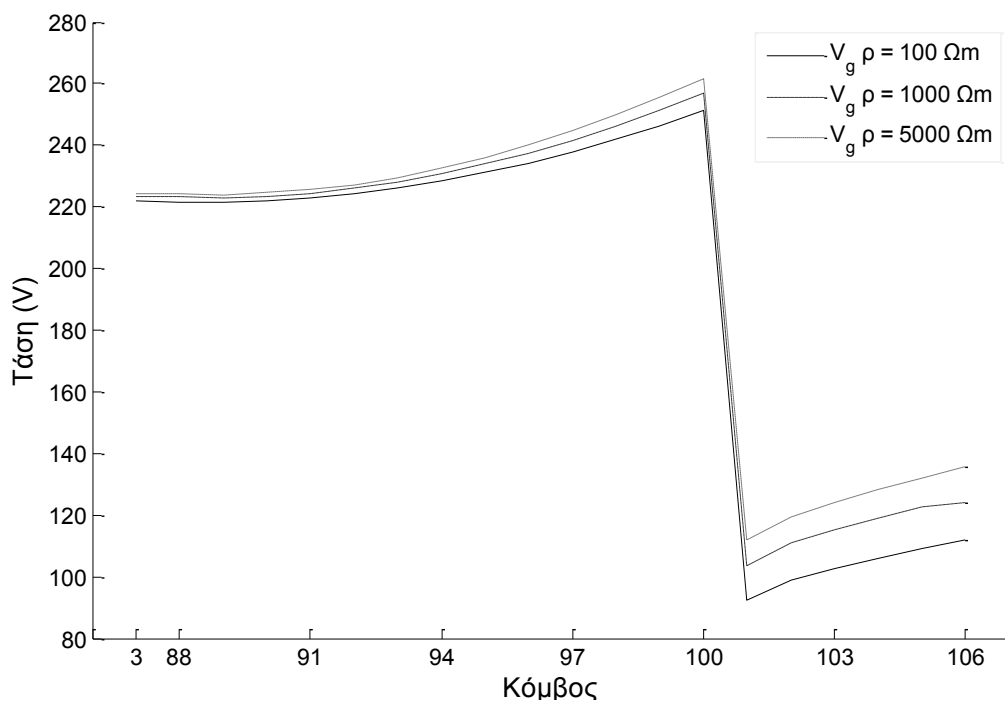
Στο σχήμα 5.2.-10 φαίνονται οι τάσεις φάσεως-προς-ουδέτερο στον κόμβο 21 της πρότυπης γραμμής κατά IEEE για την ανάλυση τάσεων ουδετέρου προς γη (περίπτωση Γ), ως συνάρτηση του σημείου αποκοπής του ουδετέρου. Επιπροσθέτως, η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στις τάσεις φάσεως-προς-ουδέτερο φαίνεται στο σχήμα 5.2.-11. Η φασικές τάσεις στον κόμβο 21 χωρίς αποκοπή του ουδετέρου είναι $V_{an} = 6832 \text{ V} \angle -0.9$, $V_{bn} = 6998 \text{ V} \angle -122.7$, και $V_{cn} = 7032 \text{ V} \angle 119.6$.

Σημείο αποκοπής	Κόμβος	Τάση ουδετέρου (V)			
		Θεμελιώδης		3 ^η αρμονική	
		Με πηνίο	Χωρίς πηνίο	Με πηνίο	Χωρίς πηνίο
9-10	23	71.6 \angle -120	72.8 \angle -121	8.6 \angle -126	8.6 \angle -125
	44	532.0 \angle 162	533.6 \angle 136	44.6 \angle 145	44.7 \angle 145
39-40	53	515.3 \angle 139	516.8 \angle 139	43.6 \angle 155	43.6 \angle 155
	79	237.8 \angle -67	237.1 \angle -68	16.4 \angle -63	16.4 \angle -63
67-68	87	231.2 \angle -66	230.5 \angle -66	15.8 \angle -59	15.8 \angle -59
	106	1261 \angle -12	1255 \angle -12	93.2 \angle 12	93.1 \angle 12
100-101	115	1224 \angle -10	1218 \angle -9	90.6 \angle 18	90.5 \angle 18

Πίνακας 5.2.-3: Επίπεδα τάσεως του ουδετέρου (περίπτωση Β -βλ. σχήμα 5.2.-2).

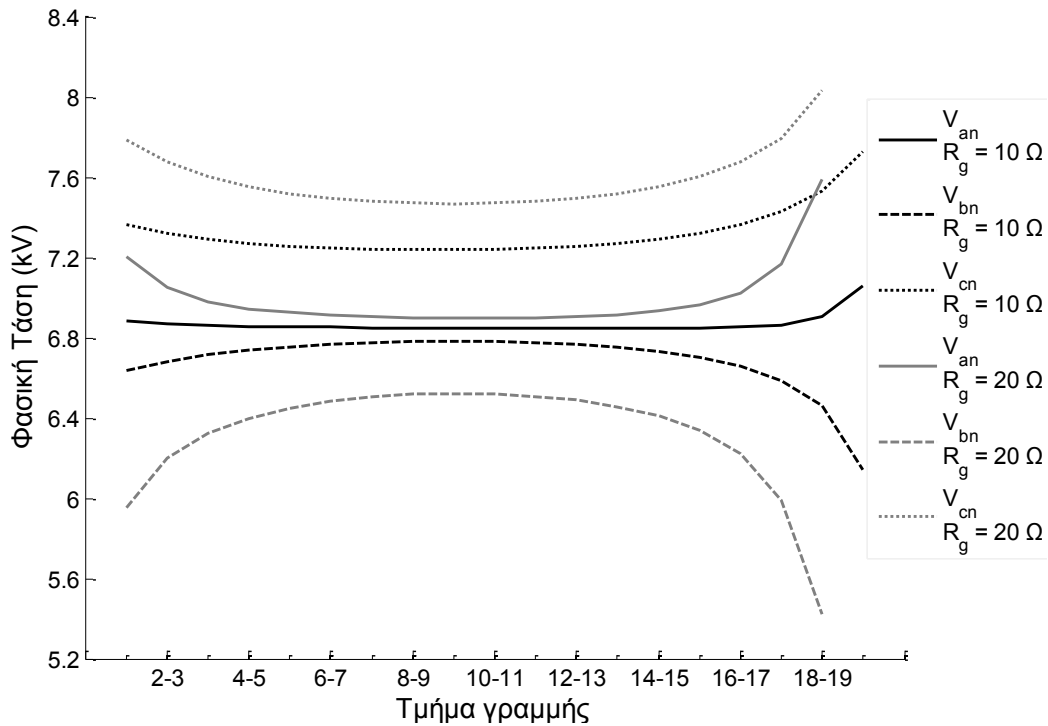


Σχήμα 5.2.-8: Επίπεδα τάσεως ουδέτερου, όταν η αποκοπή του ουδέτερου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 39 και 40 (περίπτωση Β -βλ. σχήμα 5.2.-2).



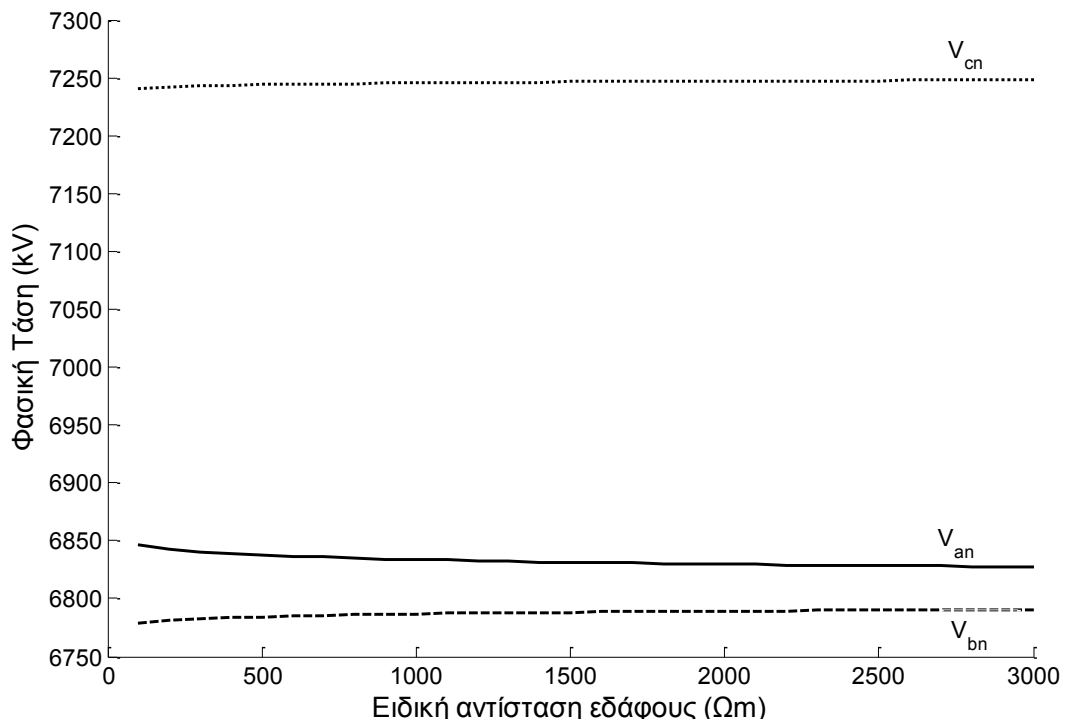
Σχήμα 5.2.-9: Επίπεδα τάσεως ισοδύναμου αγωγού γης, όταν η αποκοπή του ουδέτερου έχει συμβεί ανάμεσα στους κόμβους 100 και 101 (περίπτωση Β -βλ. σχήμα 5.2.-2).

ρ : Ειδική αντίσταση εδάφους



Σχήμα 5.2.-10: Επίπεδα τάσεως φάσεως-ουδετέρου στον κόμβο 21, συναρτήσει του τμήματος στο οποίο αποκόπτεται ο ουδέτερος (περίπτωση Γ).

R_g : Αντίσταση ηλεκτροδίου γειώσεως



Σχήμα 5.2.-11: Επίπεδα τάσεως φάσεως-ουδετέρου στον κόμβο 21, συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Κομμένος ουδέτερος στο τμήμα μεταξύ των κόμβων 10 και 11 (περίπτωση Γ -βλ. σχήμα 5.2.-3).

5.3. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων

Η αποκοπή του ουδετέρου έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της τάσεως του ουδετέρου κατάντη του σημείου αποκοπής (εξαιτίας της ασυμμετρίας της φόρτισης), η οποία στην συνέχεια προκαλεί ασυμμετρία των τάσεων φάσης προς γη. Ειδικότερα, οι τάσεις φάσης προς γη μπορούν να ξεπεράσουν το όριο $\pm 10\%$ της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Εναρμόνισης Τάσεων, και το όριο $-13,3/+5,8\%$ του ANSI C84.1.

Χαρακτηριστικώς, από το σχήμα 5.2.-4 φαίνεται ότι η φάση b, ως λιγότερο φορτισμένη, εμφανίζει αυξημένο επίπεδο τάσης προς τον ουδέτερο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ρεύμα επιστροφής I_n το οποίο είναι το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος των φάσεων κατάντη του σημείου της αποκοπής. Επομένως, η τάση ουδετέρου προς γη, η οποία είναι σχεδόν συμφασική προς το ρεύμα επιστροφής (η αντίσταση γείωσης είναι κατά κύριο λόγο ωμική, με το οποίο επαγωγικό μέρος να προέρχεται από τον αγωγό ουδετέρου), έχει αντίθετη φάση από την τάση της b φάσης. Τελικώς, η τάση της φάσης b προς τον ουδέτερο εμφανίζεται αυξημένη. Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό, οι τάσεις των φάσεων a και c προς τον ουδέτερο εμφανίζονται μειωμένες. Σε αυτό το σημείο αξ σημειωθεί ότι η αύξηση της αντιστάσεως των ηλεκτροδίων γειώσεως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων ουδετέρου προς γη (σχήμα 5.2.-6).

Από το σχήμα 5.2.-5 μπορεί να συναχθεί ότι η αποκοπή του ουδετέρου έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των επιπέδων τάσεως φάσεως-προς-ουδέτερο της 3^{ης} αρμονικής. Καθώς οι αρμονικές τρίτης τάξεως είναι ομοπολικές, τα ρεύματα φόρτισης συνεισφέρουν το αλγεβρικό άθροισμά τους στο ρεύμα επιστροφής.

Τα φορτία σταθερής ισχύος κατάντη του σημείου αποκοπής δημιουργούν ένα βρόχο θετικής αναδράσεως για την μεταβολή της τάσεως του ουδετέρου. Οι βαρέως-φορτισμένες φάσεις εμφανίζουν πτώση της τάσεως φάσεως προς ουδέτερο (όπως αναλύθηκε ανωτέρω), η οποία μείωση με την σειρά της οδηγεί σε μεγαλύτερα ρεύματα φάσεως αυξάνοντας την πτώση της τάσεως ακόμα περισσότερο. Το ίδιο ισχύει για τις ελαφρά φορτισμένες φάσεις και την αύξηση της τάσεως. Με παρόμοιο σκεπτικό, συνάγεται ότι τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας δημιουργούν ένα βρόχο αρνητικής ανάδρασης. Τα φορτία σταθερής εντάσεως δεν δημιουργούν βρόχο αναδράσεως. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διαπιστωθεί στο σχήμα 5.2.-6, όπου τα φορτία σταθερής ισχύος προκαλούν σημαντικά μεγαλύτερη ασυμμετρία τάσεων από τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας.

Τα σχήματα 5.2.-7 και 5.2.-10 (περιπτώσεις Α και Γ αντίστοιχα - βλ. σχήματα 5.2.-1 και 5.2.-3 αντίστοιχα) επιδεικνύουν την επίδραση του σημείου της αποκοπής. Η επίδραση είναι περισσότερο εμφανής στην περίπτωση Γ, καθώς στην περίπτωση Α η γραμμή φέρει φορτία σε πολλαπλούς στύλους και επομένως η ασυμμετρία της φόρτισης κατάντη του σημείου αποκοπής είναι άμεση συνάρτηση του σημείου, ενόσω η γραμμή της περίπτωσης Γ είναι φορτισμένη μόνο στον τελευταίο στύλο. Καθώς, το ρεύμα επιστροφής διαμοιράζεται αρχικά ανάμεσα στις γειώσεις κατάντη του σημείου αποκοπής, και στην συνέχεια διαμοιράζεται εκ νέου ανάμεσα στις γειώσεις ανάντη του σημείου αποκοπής, η σύνθετη αντίσταση του δρόμου επιστροφής μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$Z_r = Z_d + z_{gg}^{abr} + Z_u \approx \left(\sum_{m \in D} \frac{1}{R_{g,m}} \right)^{-1} + z_{gg}^{abr} + \left(\sum_{m \in U} \frac{1}{R_{g,m}} \right)^{-1} \quad (5.3.-1)$$

όπου Z_r είναι η σύνθετη αντίσταση του δρόμου επιστροφής, Z_d και Z_u είναι οι σύνθετες αντιστάσεις του δρόμου επιστροφής κατάντη και ανάντη, αντίστοιχα, του σημείου αποκοπής, z_{gg}^{abr} είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου αγωγού γης του τμήματος της γραμμής, στο οποίο έχει αποκοπεί ο ουδέτερος, και D και U είναι τα σύνολα των κόμβων κατάντη και ανάντη, αντίστοιχα, του σημείου αποκοπής. Η σχέση (5.3.-1) είναι μια προσέγγιση καθώς δεν λαμβάνει υπ' όψιν τις αντιστάσεις του ουδέτερου αγωγού και του ισοδύναμου αγωγού γης. Αν όλες οι αντιστάσεις των ηλεκτροδίων γειώσεως θεωρηθούν ίσες, η σύνθετη αντίσταση του δρόμου επιστροφής ελαχιστοποιείται όταν τα D και U είναι ίσα. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται από το σχήμα 5.2.-10 (η ασυμμετρία των τάσεων ελαχιστοποιείται όταν ο ουδέτερος αποκόπτεται στην μέση της γραμμής).

Στον πίνακα 5.2.-3 φαίνεται η επίδραση του πηνίου στην μεταβολή της τάσεως του ουδέτερου στους κόμβους, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με φορτία. Μπορεί να συναχθεί ότι η επίδραση κατάντη του σημείου αποκοπής είναι αμελητέα. Ωστόσο, ανάντη του σημείου αποκοπής, το πηνίο αυξάνει το επίπεδο τάσεως του ουδέτερου καθώς και του ισοδύναμου αγωγού γης (σχήμα 5.2.-8). Αυτό, με την σειρά του, προκαλεί μια μικρή ασυμμετρία των τάσεων και στους κόμβους ανάντη του σημείου αποκοπής.

Η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στα επίπεδα τάσεως του ισοδύναμου αγωγού γης φαίνεται στο σχήμα 5.2.-9. Επιπροσθέτως, οι τάσεις φάσεως

προς ουδέτερο δεν εμφανίζουν σημαντική ευαισθησία στις μεταβολές της ειδικής αντιστάσεως του εδάφους (σχήμα 5.2-11).

Ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για την επίτευξη συγκλίσεως είναι συνάρτηση του σημείου αποκοπής. Ωστόσο, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που παρατηρήθηκε ήταν 9, για την περίπτωση Β (σχήμα 5.2.-2), όταν ο ουδέτερος αποκόπηκε ανάμεσα στους κόμβους 100 και 101.

6. Διερεύνηση των συνεπειών στην διηλεκτρική αντοχή του λαδιού εξαιτίας της μεταφοράς των μετασχηματιστών στην θέση εγκατάστασής τους και της επακόλουθης ψυχρής εκκίνησης

Η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι σε στενή σχέση με την αξιόπιστη λειτουργία των μετασχηματιστών διανομής. Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του μονωτικού λαδιού μέσα στον μετασχηματιστή παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του. Το λάδι λειτουργεί τόσο ως ηλεκτρική μόνωση όσο και ως ψυκτικό μέσο του μετασχηματιστή. Στην πλειοψηφία των μετασχηματιστών το μονωτικό λάδι είναι ορυκτό με βάση το πετρέλαιο [98].

Τα λάδια των μετασχηματιστών αναμένεται να λειτουργούν αποτελεσματικά τόσο σε χαμηλές θερμοκρασίες (που οφείλονται σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος), όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες (που οφείλονται στη φόρτιση ή υπερφόρτιση του μετασχηματιστή σε θερμό περιβάλλον). Η γωνία απωλειών δ , η διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , και η τάση διασπάσεως ενδιαφέρουν ιδιαίτερα στην αξιολόγηση των μονωτικών ελαίων.

Τα υγρά τα οποία είναι απλά σε δομή και δεν περιέχουν ακαθαρσίες (ακόμα και σε ίχνη της τάξεως του 1 ανά 10^9 μόρια) είναι γνωστά ως «καθαρά υγρά». Ωστόσο, τα βιομηχανικά υγρά περιέχουν τόσο μονωτικά όσο και αγώγιμα σωματίδια [99]. Τα σωματίδια σε βιομηχανικά έλαια έχουν διάμετρο από 0,1 έως 50 μm [100].

Καθώς τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής πλησιάζουν το τέλος της σχεδιασμένης προβλεπόμενης ζωής τους [101], ένας σημαντικός αριθμός νέων μετασχηματιστών εγκαθίσταται. Επιπροσθέτως, ένας μεγάλος αριθμός μετασχηματιστών διανομής εγκαθίσταται για να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε διάσπαση της μόνωσης του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής, αμέσως μετά την εγκατάστασή του και την αρχική τροφοδότηση. Σημαντικό μέρος των διασπάσεων αυτών έλαβε χώρα ενώ οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος ήταν μικρές και το φορτίο του Μ/Σ περιορισμένο.

Ακολούθως, γίνεται μια πειραματική έρευνα του κατά πόσον η μεταφορά των μετασχηματιστών στην θέση εγκαταστάσεώς τους προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής

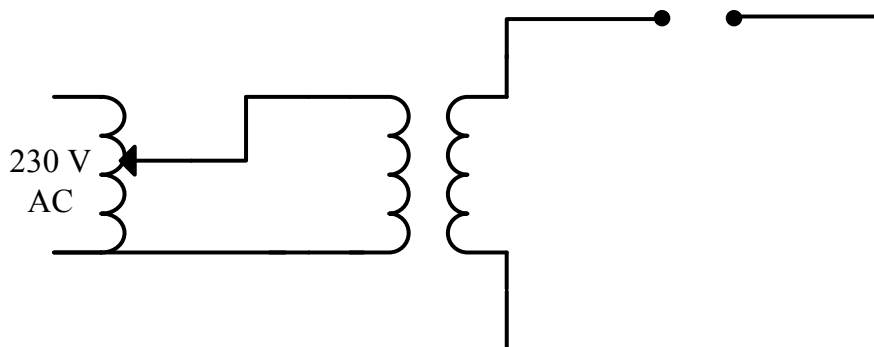
αντοχής του ελαίου. Προς τούτο έγιναν μετρήσεις με προσομοίωση της καταστάσεως του ελαίου πριν και μετά την θέση σε λειτουργία των μετασχηματιστών.

6.1. Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 156/95. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι η BAUR DPA 75 με αυτόματη αύξηση της τάσης μέχρι τα 75 kV, με ρυθμό 2 kV/s. Τα ηλεκτρόδια είναι ημισφαιρικά και η απόστασή τους είχε ρυθμιστεί στα 2,5 mm. Η χωρητικότητα του δοχείου δοκιμής είναι 0,4 lt. Στο σχήμα 6.1.-1 φαίνεται η συσκευή δοκιμής και στο σχήμα 6.1.-2 το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 6.1.-1: Η συσκευή δοκιμής BAUR DPA 75



Σχήμα 6.1.-2: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της πειραματικής διάταξης.

Για κάθε δείγμα λαδιού (και για πειραματικό στάδιο) έγιναν έξι (6) διασπάσεις, καθώς αναμένεται ότι σε κάθε δοκιμή η κατανομή του αριθμού και του μεγέθους των σωματιδίων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια μεταβάλλεται στοχαστικά.

Σημειώνεται ότι αν η τάση, κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, φθάσει τα 75 kV και δεν συμβεί διάσπαση (δηλαδή η τάση διάσπασης είναι μεγαλύτερη των 75 kV), η ένδειξη που δίνει η συσκευή είναι 75 kV.

Τα σωματίδια στον όγκο του ελαίου του μετασχηματιστή μετρήθηκαν μέσω ενός μετρητή σωματιδίων. Επιπλέον, μετρήθηκε ο αριθμός των σωματιδίων από δείγμα ελαίου από το βαρέλι το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα 6.1.-1. Οι μετρηθείσες τιμές ήταν κάτω από τα όρια της οδηγίας NAS 1638/Grade 7.

Μέγεθος σωματιδίου(μm)	Αριθμός σωματιδίων σε 100 ml ελαίου από μετασχηματιστή	Αριθμός σωματιδίων σε 100 ml ελαίου από βαρέλι	NAS 1638/7 όρια
5-15	16224	13686	32000
15-25	1299	670	5700
25-50	375	200	1012
50-100	85	32	180
>100	5	2	32

Πίνακας 6.1.-1: Αριθμός σωματιδίων σε 100 ml.

Το κινηματικό ιξώδες μετρήθηκε στους 40 και 100 °C κάνοντας χρήση ενός ιξωδομέτρου τύπου Stabinger και βρέθηκε ίση προς 12,93 και 3,104 cSt αντιστοίχως. Η περιεχόμενη υγρασία μετρήθηκε μέσω υγρασιόμετρου και βρέθηκε ίση προς 32 ppm.

6.1.1. Επίδραση της μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης

Για την διερεύνηση της επίδρασης της μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης στην διηλεκτρική αντοχή του ελαίου, μετρήθηκε η διηλεκτρική αντοχή υπό εναλλασσόμενη τάση του μονωτικού ελαίου, πριν και μετά από ανακίνηση. Η συσκευή ανακίνησης κατασκευάστηκε αποκλειστικά για την ανακίνηση των

δειγμάτων ελαίου με τον ίδιο τρόπο. Δοκιμάστηκαν πέντε δείγματα ελαίου από το ίδιο δοχείο.

Η πειραματική διαδικασία είχε ως εξής:

--1^ο Στάδιο: Αρχικώς, μετράται η τάση διάσπασης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

--2^ο Στάδιο: Στην συνέχεια, το λάδι ανακινείται για ένα λεπτό και μετράται η τάση διάσπασης.

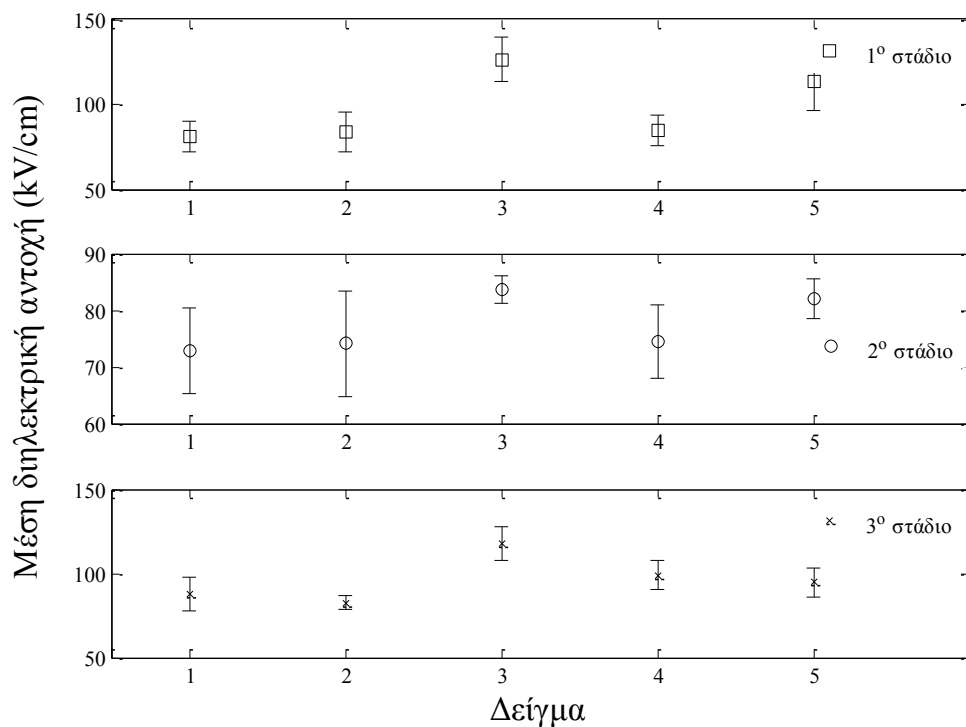
--3^ο Στάδιο: Τελικώς, το ίδιο λάδι ανακινείται για ένα λεπτό και θερμαίνεται στους $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Στην συνέχεια, μετράται η τάση διάσπασης.

Αυτές οι πειραματικές συνθήκες προσομοιώνουν ικανοποιητικά τις συνθήκες ενός μετασχηματιστή αμέσως μετά την εγκατάσταση του. Συγκεκριμένα, οι δοκιμές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και μετά από ανακίνηση προσομοιώνουν τις συνθήκες της ψυχρής εκκίνησης. Οι δοκιμές μετά από ανακίνηση και θέρμανση του ελαίου στους $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι ενδεικτικές των συνθηκών μετά από λειτουργία για κάποιο χρονικό διάστημα (το λάδι θερμαίνεται εξαιτίας των διηλεκτρικών απωλειών, καθώς και των απωλειών σιδήρου και χαλκού).

Η μέση διηλεκτρική αντοχή και τυπική απόκλιση για κάθε δείγμα και στάδιο φαίνονται στον πίνακα 6.1.1.-1, και το σχήμα 6.1.1.-1.

1 ^ο στάδιο	#1	#2	#3	#4	#5
Μέση τιμή (kV/cm)	80,87	83,85	126,25	84,95	113,96
Τυπική απόκλιση (kV/cm)	8,9	11,73	13,16	9,11	17,71
2 ^ο στάδιο	#1	#2	#3	#4	#5
Μέση τιμή (kV/cm)	72,95	74,11	83,71	74,4	82,04
Τυπική απόκλιση (kV/cm)	7,56	9,3	2,41	6,5	3,51
3 ^ο στάδιο	#1	#2	#3	#4	#5
Μέση τιμή (kV/cm)	88,07	82,62	117,67	98,91	94,95
Τυπική απόκλιση (kV/cm)	10,09	4,08	9,82	8,43	8,67

Πίνακας 6.1.1.-1: Μέση διηλεκτρική αντοχή και τυπική απόκλιση για τα τρία στάδια



Σχήμα 6.1.1.-1: Μέση διηλεκτρική αντοχή και τυπική απόκλιση για τα τρία στάδια

6.1.2. Επίδραση της θερμοκρασίας

Για την διερεύνηση των συνεπειών μιας ψυχρής εκκίνησης στην μόνωση των μετασχηματιστών, μετράται η τάση διάσπασης του λαδιού σε διάφορες θερμοκρασίες. Η θερμική σταθερά χρόνου των μετασχηματιστών είναι της τάξεως των 3 h [102, 103]. Επομένως, το λάδι θα λειτουργήσει για μια μεγάλη χρονική περίοδο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Δείγματα από το ίδιο εμπορικό λάδι μετασχηματιστών δοκιμάστηκαν σε διάφορες θερμοκρασίες με σκοπό να προσδιοριστεί ο τρόπος που μεταβάλλεται η τάση διάσπασης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό, εκτός από το δείγμα λαδιού που δοκιμάστηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, άλλα δείγματα ψύχθηκαν ενώ άλλα θερμάνθηκαν πριν την πραγματοποίηση των δοκιμών. Έτσι, οι θερμοκρασίες των δειγμάτων κατά τις δοκιμές κυμάνθηκαν από τους $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.1.2.-1, και το σχήμα 6.1.2.-1.

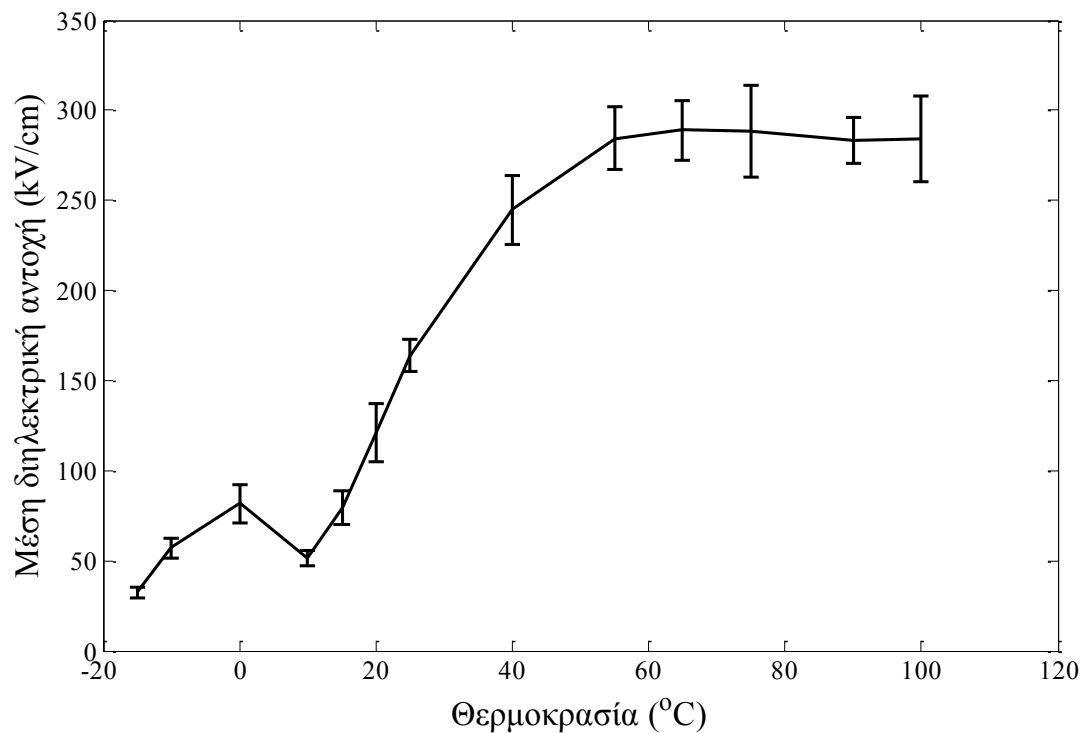
T (°C)	$V_{d,1}$ (kV)	$V_{d,2}$ (kV)	$V_{d,3}$ (kV)	$V_{d,4}$ (kV)	$V_{d,5}$ (kV)	$V_{d,6}$ (kV)	$V_{d,avg}$ (kV)	$E_{d,avg}$ (kV/cm)	Τύπ Αποκ (kV/cm)
-15	7,8	8,9	7,7	9,1	7,2	7,9	8,1	32,4	2,7
-10	16,3	15,5	13,9	14,2	12,9	12,6	14,2	56,9	5,3
0	24,1	18,5	17,6	18,8	23,9	19,6	20,4	81,7	10,4
10	13	11,8	13,8	14,5	12,6	11,4	12,9	51,4	4,3
15	22,6	16,9	17,9	22	21,6	18,0	19,8	79,3	9,1
20	23,6	32,6	34,3	34,0	30,6	26,3	30,2	120,9	15,9
25	42,4	40,7	45	40,4	38,5	38,8	41,0	163,9	8,9
40	59,9	61,7	58,7	58,2	71,4	57,1	61,2	244,7	21,0
55	70,8	65	75	65,8	75	75	71,1	284,4	18,8
65	75	69,1	64,3	75	75	75	72,2	288,9	18,2
75	58	75	75	75	75	75	72,2	288,7	27,8
90	67,2	70,7	68,1	75	75	69	70,8	283,3	13,7
100	58,5	73,2	75	69,9	75	75	71,1	284,4	25,9

Πίνακας 6.1.2.-1: Διηλεκτρική αντοχή ελαίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

$V_{d,i}$: Τάση διασπάσεως του ελαίου την i -οστή επανάληψη

$V_{d,avg}$: Μέση τιμή της τάσεως διασπάσεως

$E_{d,avg}$: Μέση τιμή της διηλεκτρικής αντοχής



Σχήμα 6.1.2.-1: Διηλεκτρική αντοχή ελαίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

6.2. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων

6.2.1. Σχόλια επί της επίδρασης της μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ανακίνηση του μονωτικού ελαίου επί ένα λεπτό προκαλεί σημαντική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του. Συγκεκριμένα, η ανακίνηση προκαλεί μια μείωση 20,5 kV/cm (20,9%) της διηλεκτρικής αντοχής. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην δημιουργία φυσαλίδων οι οποίες διατάσσονται στην διεύθυνση του πεδίου και επιμηκύνονται. Η ακτίνα ισορροπίας R_{eq} των φυσαλίδων είναι [104, 105]:

$$R_{eq} = \frac{2\sigma}{p_i - p_o} \quad (6.2.1.-1)$$

όπου σ η επιφανειακή τάση, και p_i και p_o είναι οι πιέσεις στο εσωτερικό και εξωτερικό της φυσαλίδας αντίστοιχα. Ωστόσο, εξαιτίας της ανακίνησης οι ακτίνες των φυσαλίδων ήταν μεγαλύτερες της ακτίνας ισορροπίας. Όταν η πτώση τάσης στο εσωτερικό της φυσαλίδας ξεπεράσει μια οριακή τιμή τότε δημιουργείται μερική εκκένωση και κατά συνέπεια γήρανση του ελαίου, και πιθανή διάσπαση του.

Στην συνέχεια, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στους 40 °C αντιστρέφει τις αρνητικές επιπτώσεις της ανακίνησης. Η μέση διηλεκτρική αντοχή είναι μειωμένη κατά 1,5 kV/cm σε σχέση με την αρχική. Ακόμα περισσότερο, σε δύο από τα πέντε δείγματα, η διηλεκτρική αντοχή εμφανίζεται βελτιωμένη σε σχέση με την αρχική (χωρίς ανακίνηση). Η αύξηση της θερμοκρασίας διευκολύνει την διαφυγή των φυσαλίδων προς την επιφάνεια καθώς μειώνει το ιξώδες και την πυκνότητα του ελαίου [106, 107]. Αυτό εξηγεί ως ένα βαθμό πως το λάδι ανακτά μέρος της διηλεκτρικής του αντοχής.

Τελικώς, προκύπτει πως η ανακίνηση του μονωτικού ελαίου και κατά συνέπεια η μεταφορά του μετασχηματιστή στον τόπο εγκατάστασής του οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Η φόρτιση του μετασχηματιστή θερμαίνει το μονωτικό έλαιο διευκολύνοντας την διαφυγή των φυσαλίδων με αποτέλεσμα την ανάκτηση της μονωτικής ικανότητας. Συμπεραίνεται πως η λειτουργία του μετασχηματιστή με

μικρά φορτία δεν αυξάνει σημαντικά την θερμοκρασία του με αποτέλεσμα να μην ανακτάται η διηλεκτρική αντοχή. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξηγηθεί το πρόβλημα διηλεκτρικής αντοχής σε μετασχηματιστές διανομής υπό χαμηλή φόρτιση σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την εγκατάστασή τους στο δίκτυο.

6.2.2. Σχόλια επί της επίδρασης της θερμοκρασίας

Από τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις της τάσης διάσπασης του λαδιού συναρτήσει της θερμοκρασίας (σχήμα 6.1.2.-1) γίνεται φανερό ότι η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού εμφανίζει θετική εξάρτηση από την αύξηση της θερμοκρασίας. Στις θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργεί συνήθως ο μετασχηματιστής, το μονωτικό λάδι επιδεικνύει πολύ καλή συμπεριφορά από άποψη διηλεκτρικής αντοχής, ενώ αντίθετα στις χαμηλές και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες προκύπτουν προβλήματα διηλεκτρικής αντοχής. Επιπροσθέτως, ένα τοπικό ελάχιστο εμφανίζεται στους 10 °C. Η διηλεκτρική αντοχή για 17 από τις 30 δοκιμές (56,67%) σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 55 °C είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη δυνατή καταπόνηση της συσκευής δοκιμής. Επομένως, δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για το αν η θετική εξάρτηση της διηλεκτρικής αντοχής από την θερμοκρασία συνεχίζει και για υψηλότερες θερμοκρασίες.

Παρομοίως, ο Yeckel et al στην [104] αναφέρει θετική εξάρτηση της διηλεκτρικής αντοχής από την θερμοκρασία για λάδι poly- α olefin και αρνητική εξάρτηση για λάδι DIALA. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο διαφορετικό ιξώδες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν απρόσμενα καθώς μεγαλύτερες θερμοκρασίες προκαλούν χειρότερη διηλεκτρική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, αυξάνεται η αγωγιμότητα εξαιτίας της αυξημένης κινητικότητας των φορέων [108], μειώνεται η αντίσταση μονώσεως [109, 110], και οι διηλεκτρικές απώλειες αυξάνονται [111]. Ο Fofana στην [112] αναφέρει ότι η αυξητική τάση της αγωγιμότητας με την θερμοκρασία ισχύει και στις υπό το μηδέν θερμοκρασίες.

Καθώς τα εξεταζόμενα έλαια είναι τεχνικώς καθαρά και με μικρή περιεχόμενη υγρασία (32 ppm, μικρότερη δηλαδή της μέγιστης διαλυτότητας), μπορεί να θεωρηθεί ότι η διάσπαση προκαλείται από τον σχηματισμό γεφυρών αγωγίων σωματιδίων. Η κίνηση των σωματιδίων καθορίζεται από τις ηλεκτρικές δυνάμεις, την αδράνεια, και τις δυνάμεις από το ιξώδες. Πρέπει να τονιστεί ότι το ιξώδες εξαρτάται από την

θερμοκρασία. Η ύπαρξη νέφους σωματιδίων αυξάνει σημαντικά την μετατόπιση των σωματιδίων επιτρέποντας τους να φτάσουν το κέντρο των ηλεκτροδίων.

Όταν δυο αντιταγμένα νέφη σωματιδίων συναντηθούν στο κέντρο των ηλεκτροδίων, τα σωματίδια ωθούνται καθέτως μακριά από τον άξονα συμμετρίας των ηλεκτροδίων. Αν η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη της ηλεκτροφορητικής δύναμης, τα σωματίδια διαχέονται στην περιοχή ασθενούς ηλεκτροφόρησης, και σταματά ο σχηματισμός της γέφυρας.

Το ιξώδες ενός υγρού δύνεται ως [113]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + aT + bT^2} \quad (6.2.2.-1)$$

όπου a , b είναι σταθερές του υγρού, και η_0 το ιξώδες στους 0°C . Επομένως, με αυξανόμενη θερμοκρασία, ο αριθμός Reynolds Re αυξάνει (ο αριθμός Reynolds Re αντιστρόφως ανάλογος του κινηματικού ιξώδους). Αυτό με την σειρά του, αυξάνει την κάθετη ώθηση. Επιπροσθέτως, καθώς η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου είναι $2 k T$, η θερμική κίνηση είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Η θερμική κίνηση προκαλεί μια συνολική διάχυση των σωματιδίων μακριά από την καταπονούμενη περιοχή προς την περιοχή ασθενούς ηλεκτροφόρησης, καθώς η στερεά γωνία Ω_o της περιοχής ασθενούς ηλεκτροφόρησης όπως φαίνεται από τα σημεία της περιοχής ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι μεγαλύτερη από την στερεά γωνία Ω_e του διακένου όπως φαίνεται από τα σημεία εκτός της καταπονούμενης περιοχής. Επομένως, ο σχηματισμός γεφυρών εμποδίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.

7. Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων

7.1. Σχόλια επί της μεθόδου προστασίας από πιθανές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από την αποκοπή αγωγού δικτύου διανομής

Εξετάστηκε η περίπτωση αποκοπής και πτώσης στο έδαφος γυμνού αγωγού αλουμινίου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης. Όπως διαπιστώθηκε, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η ασφάλεια στο ασφαλειοκιβώτιο του υποσταθμού να μην τηχθεί με αποτέλεσμα την διακινδύνευση της ανθρώπινης ζωής ή την πρόκληση πυρκαγιάς (αν υπάρχουν εύφλεκτα υλικά στην περιοχή). Για να αντιμετωπιστούν αυτοί οι κίνδυνοι, προτάθηκε μια μέθοδος προστασίας η οποία απενεργοποιεί άμεσα την γραμμή σε περίπτωση αποκοπής ενός ή περισσότερων αγωγών.

Εκ των προαναφερθέντων συμπεραίνεται ότι χρειάζεται να γίνει σχετική πρόβλεψη στους κανονισμούς, ώστε να αποκλείονται οι προαναφερθείσες δυσμενείς επιπτώσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

7.2. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της μεθόδου υπολογισμού της αυξήσεως της θερμοκρασίας από τον κύκλο λειτουργίας των διακοπών αυτόματης επαναφοράς

Αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης εναερίων αγωγών από διακοπόμενα βραχυκυκλώματα λόγω των κύκλων λειτουργίας αυτομάτων διακοπών και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με την μέθοδο του προτύπου IEC 60865-1. Η νέα αυτή προτεινόμενη μέθοδος αντιμετωπίζει κάθε βραχυκύκλωμα ως ένα ξεχωριστό συμβάν. Η προτεινόμενη μέθοδος δίνει μεγαλύτερες αυξήσεις θερμοκρασίας για σφάλματα κοντά στον υποσταθμό υψηλής τάσης και μικρότερες σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Επιπλέον, στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση των χρονικών χαρακτηριστικών του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς στην θερμική καταπόνηση των αγωγών. Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως η θερμική καταπόνηση είναι πολύ μεγαλύτερη για μετρίως αντίστροφη καμπύλη χρόνου ρεύματος σε σχέση με εξαιρετικά αντίστροφη καμπύλη. Ακόμη, μελετήθηκε η επίδραση της χρονικής διάρκειας ανάμεσα στα διαδοχικά βραχυκυκλώματα, και βρέθηκε μικρή, ενώ βρέθηκε ότι ο αριθμός γρήγορων προς αργών λειτουργιών των αυτομάτων διακοπών μπορεί να έχει σημαντική επίδραση.

7.3. Σχόλια επί του προτεινόμενου κλιμακωτού δικτύου αντιστάσεων ξύλινου στύλου και της επαλήθευσης αυτού μέσω αναλύσεως πεπερασμένων στοιχείων

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων 8 τοπολογιών στύλου-τραβέρσας. Από τα αποτελέσματα της αναλύσεως, υπολογίστηκε η επίδραση της μεταλλικής αντηρίδας, του υλικού της τραβέρσας (μεταλλική ή ξύλινη) και της περιεχόμενης υγρασίας στην συνολική αντίσταση της κατασκευής. Βρέθηκε πως η αντηρίδα μπορεί να μειώσει την αντίσταση της κατασκευής έως και 37,4%, ενώ η αντικατάσταση της ξύλινης τραβέρσας από μεταλλική μπορεί να μειώσει την αντίσταση ως και 14,7 φορές. Στην συνέχεια, προτάθηκε ένα νέο κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων της τραβέρσας, του στύλου και της μεταξύ τους διασύνδεσης το οποίο ενσωματώνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά την ροή του ρεύματος. Τα αποτελέσματα του κλιμακωτού δικτύου αυτού προσεγγίζουν με καλή ακρίβεια τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

7.4. Σχόλια επί του προτεινόμενου αλγορίθμου ροής φορτίου συστημάτων διανομής με αποκοπή του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

Αναπτύχθηκε αλγόριθμος ροής φορτίου για δίκτυα διανομής με πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο, ο οποίος έχει υποστεί αποκοπή. Ο αλγόριθμος αυτός

μοντελοποιεί με ακρίβεια το ρεύμα επιστροφής. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε 3 διαφορετικά δίκτυα διανομής.

Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση των συνεπειών της αποκοπής του ουδετέρου, καθώς και για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων συστημάτων γειώσεως στην μείωση των διαταραχών της τάσεως κατά την αποκοπή του ουδετέρου. Ακόμα, αναλύθηκε η επίδραση της ασύμμετρης φόρτισης στα επίπεδα των τάσεων φάσης-ουδετέρου και ουδετέρου-γης, και βρέθηκε ότι τα φορτία υποβάλλονται σε τάσεις που μπορούν να τους προκαλέσουν βλάβες.

7.5. Σχόλια επί της πειραματικής διερεύνησης των συνεπειών στην διηλεκτρική αντοχή του λαδιού εξαιτίας της μεταφοράς μετασχηματιστών ελαίου στην θέση εγκαταστάσεως τους και της επακόλουθης ψυχρής εκκινήσεώς τους.

Διερευνήθηκε το φαινόμενο της διασπάσεως της μονώσεως μικρό χρονικό διάστημα μετά την εγκατάσταση του μετασχηματιστή, και την πρώτη σύνδεσή του στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της μεταφοράς και της θερμοκρασίας. Βρέθηκε ότι η μεταφορά μειώνει την διηλεκτρική αντοχή του ελαίου του μετασχηματιστή. Επιπροσθέτως, βρέθηκε ότι η διηλεκτρική αντοχή του ελαίου εμφανίζει θετική εξάρτηση από την θερμοκρασία. Από τα πειραματικά αποτελέσματα μπορεί να συναχθεί ότι η διηλεκτρική αντοχή κατά την ψυχρή εκκίνηση είναι χειρότερη αυτής σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

8. Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές

Η εργασία αυτή συνέβαλε στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές σχετικά με την διηλεκτρική και θερμική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα:

- Διαπιστώθηκε ότι κατά την αποκοπή και πτώση στο έδαφος γυμνού αγωγού αλουμινίου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η ασφάλεια να μην τηχθεί με αποτέλεσμα την επέλευση κινδύνου κατά της ανθρώπινης ζωής ή την πρόκληση πυρκαγιάς.
- Προτάθηκε μια μέθοδος προστασίας η οποία απενεργοποιεί άμεσα την γραμμή σε περίπτωση αποκοπής ενός ή περισσοτέρων αγωγών διανομής χαμηλής τάσης.
- Αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης εναέριων αγωγών από διακοπτόμενα βραχυκυκλώματα (λόγω των κύκλων λειτουργίας των αυτομάτων διακοπών), η οποία αντιμετωπίζει κάθε βραχυκύκλωμα ως ένα ξεχωριστό συμβάν.
- Μελετήθηκε η επίδραση των χρονικών χαρακτηριστικών του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς στην θερμική καταπόνηση των αγωγών.
- Προτάθηκε ένα νέο κλιμακωτό δίκτυο αντιστάσεων της τραβέρσας, του στύλου και της μεταξύ τους διασύνδεσης το οποίο ενσωματώνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά την ροή του ρεύματος.
- Αναπτύχθηκε αλγόριθμος ροής φορτίου για δίκτυα διανομής με πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο, ο οποίος έχει υποστεί αποκοπή. Ο αλγόριθμος αυτός μοντελοποιεί με ακρίβεια το ρεύμα επιστροφής, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση των συνεπειών της αποκοπής του ουδετέρου, καθώς και για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων συστημάτων γειώσεως στην μείωση των διαταραχών της τάσεως κατά την αποκοπή του ουδετέρου.
- Αναλύθηκε η επίδραση της ασύμμετρης φόρτισης στα επίπεδα των τάσεων φάσης-ουδετέρου και ουδετέρου-γης, και βρέθηκε ότι τα φορτία

υποβάλλονται σε τάσεις που μπορούν να τους προκαλέσουν βλάβες, σε περίπτωση αποκοπής του ουδετέρου.

- Διερευνήθηκε πειραματικά το φαινόμενο της διασπάσεως της μονώσεως μικρό χρονικό διάστημα μετά την εγκατάσταση του μετασχηματιστή, και την πρώτη σύνδεσή του στο δίκτυο.

Σημείωση:

Στο τέλος της διατριβής αυτής, δίδονται προγράμματα για την διευκόλυνση των υπολογισμών σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής.

Παραρτήματα

Παράρτημα Ι. Ένα πρόγραμμα υπολογισμού του βέλους κάμψεως

Αγωγός ο οποίος αναρτάται από δύο σημεία ακολουθεί μια αλυσοειδή καμπύλη (σχήμα Ι.-1). Το βέλος κάμψης εξαρτάται από την δύναμη τανύσεως, το άνοιγμα μεταξύ των πυλώνων, και την επιφόρτιση του αγωγού.



Σχήμα Ι.-1: Αλυσοειδής καμπύλη αγωγού

Η επιφόρτιση του αγωγού εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (ανεμοπίεση και επίστρωση πάγου), και το βάρος του αγωγού. Η δύναμη τανύσεως εξαρτάται από την θερμοκρασία του αγωγού, και την επιφόρτιση, ενώ η θερμοκρασία του αγωγού εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το ρεύμα λειτουργίας.

Στο Παράρτημα αυτό, παρουσιάζεται πρόγραμμα για τον υπολογισμό του βέλους κάμψεως.

1. Καμπύλη του αγωγού και βέλος κάμψεως

Οι σχέσεις υπολογισμού της αλυσοειδούς καμπύλης για ισοϋψή ανάρτηση είναι [114, 115]:

$$s = 2 \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{p}{H} L\right) \quad (\text{I.1.-1})$$

$$d = \frac{H}{p} \left(\cosh\left(\frac{p}{H} L\right) - 1 \right) \quad (\text{I.1.-2})$$

$$T = H \cosh\left(\frac{p}{H} L\right) \quad (\text{I.1.-3})$$

όπου s το μήκος του αγωγού, H η δύναμη τάνυσης του αγωγού, p το βάρος του αγωγού ανά μέτρο, L το μισό της απόστασης των δύο πυλώνων, d το βέλος κάμψης του αγωγού και T η δύναμη που ασκείται στον πυλώνα.

Οι σχέσεις οι οποίες περιγράφουν την ανισοϋπή ανάρτηση (διαφορά ύψους ανάρτησης h) είναι οι εξής:

$$h = d_{o2} - d_{o1} = \frac{H_o}{p} \left(\cosh\left[\frac{p}{H_o} x_{o2}\right] - \cosh\left[\frac{p}{H_o} x_{o1}\right] \right) \quad (\text{I.1.-4})$$

$$d_{o1} = \frac{H_o}{p} \left(\cosh\left[\frac{p}{H_o} x_{o1}\right] - 1 \right) \quad (\text{I.1.-5})$$

$$d_{o2} = h + d_{o1} \quad (\text{I.1.-6})$$

όπου d_{o1} και d_{o2} είναι οι διαφορές των δυο υψών αναρτήσεως, αντίστοιχα, από το χαμηλότερο σημείο του αγωγού.

Η αλυσοειδής καμπύλη του αγωγού μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια με μια παραβολοειδή καμπύλη. Η παραβολοειδής καμπύλη ενός αγωγού αναρτημένου από δύο σημεία με υψομετρική διαφορά h δίδεται ως:

$$y(x) = \frac{p x^2}{2H} \quad (\text{I.1.-7})$$

Το μέγιστο βέλος κάμψης του αγωγού είναι [3]:

$$d = \frac{p}{2H} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2}} r_1 r_2 \quad (\text{I.1.-8})$$

όπου r_1 και r_2 οι οριζόντιες αποστάσεις από τα σημεία ανάρτησης του σημείου για το οποίο υπολογίζεται το βέλος. Τελικώς, το ολικό μήκος του αγωγού ανάμεσα στους δυο πυλώνες είναι:

$$S = 2L + \frac{p^2(2L)^3}{24H^2} + \frac{1}{2} \frac{h^2}{2L} \quad (\text{I.1.-9})$$

Η καμπύλη του αγωγού μπορεί να προσδιοριστεί από τρεις παραμέτρους, την δύναμη τανύσεως H , την θερμοκρασία $T_{αγ}$ και την επιφόρτιση p του αγωγού. Όταν αλλάξει η επιφόρτιση ή η θερμοκρασία του αγωγού, αλλάζει το μήκος του αγωγού ανάμεσα στους δυο πυλώνες. Η αλλαγή αυτή προκαλείται από την ελαστική επιμήκυνση του αγωγού (λόγω της διαφορετικής δυνάμεως τανύσεως) και από την θερμική διαστολή. Επομένως:

$$S_2 - S_1 = \frac{S_1(H_2 - H_1)}{Eq} + aS_1(T_{αγ,2} - T_{αγ,1}) \quad (\text{I.1.-10})$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού, q η διατομή του, και a ο συντελεστής θερμικής διαστολής. Από την λύση της παραπάνω εξίσωσης μέσω προγράμματος για τις διάφορες περιπτώσεις προκύπτουν τα νέα βέλη κάμψης.

2. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος

Στην συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης ενός ανοίγματος μιας γραμμής μεταφοράς. Η απόσταση μεταξύ των πυλώνων $2L$ είναι ίση προς 380 m, και η υψομετρική διαφορά των πυλώνων h είναι 29 m. Τα χαρακτηριστικά του αγωγού ACSR Linnet δίνονται στον πίνακα I.2.-1.

Ως αρχική κατάσταση στην εξίσωση αλλαγής κατάστασης λαμβάνεται η κατάσταση της γραμμής όπως φαίνεται στην μηκοτομή της αρχικής κατασκευής για θερμοκρασία αγωγών 50 °C. Το νέο βέλος κάμψης υπολογίζεται υπό την μέγιστη φόρτιση της γραμμής (στο παράδειγμα αυτό ίση προς 192 A) και τις εξής καιρικές συνθήκες: θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C και ταχύτητα ανέμου 6 στην κλίμακα Beaufort. Στιγμιότυπο του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα I.2.-1.

Χαρακτηριστικά αγωγού

Εξωτερική διάμετρος	18,31 mm
Διατομή αγωγού	198,19 mm ²
Ισοδύναμη διατομή χαλκού	107,48 mm ²
Συρματίδια	26/7
Ονομαστικό βάρος	700 kg/km
Αντίσταση DC στους 20 °C	0,164 Ω/km
Μέτρο ελαστικότητας	755 kN/m ²
Συντελεστής θερμικής διαστολής	19,2 10 ⁻⁶ /°C

Πίνακας I.2.-1: Χαρακτηριστικά του αγωγού ACSR Linnet



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κωνσταντίνου Χαλεβιδή υπό την επίβλεψη του ομότιμου καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα

Υπολογισμός του βέλους κάμψεως με ακρίβεια

Υπολογισμός θερμοκρασίας αγωγού

Ρεύμα φόρτισης	192	A
Διάμετρος αγωγού	18.31	mm
Αντίσταση αγωγού	0.164/100	Ω/m
Θερμικός συντελεστής αντίστασης	0	1/°C
Συντελεστής εκπομπής	0.5	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	40	°C
Υψόμετρο περιοχής	1000	m
Ταχύτητα αέρα	13.8	m/s
Γωνία πρόσπτωσης αέρα	90	μοίρες
Ηλιοφάνεια	<input checked="" type="checkbox"/>	

Υπολογισμός

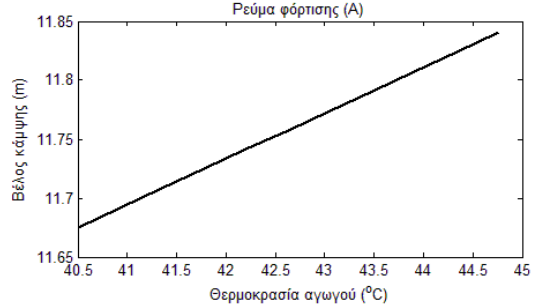
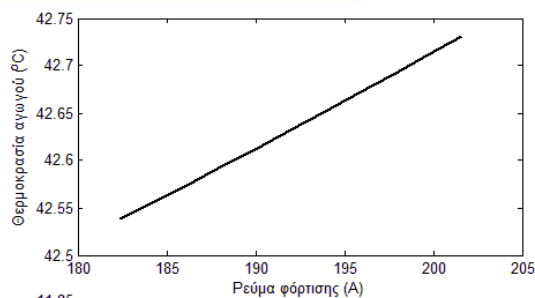
Θερμοκρασία αγωγού 42,63 °C

Υπολογισμός βέλους κάμψης

Χαρακτηριστικά αγωγού		
Βάρος αγωγού	0.7	daN/m
Μέτρο ελαστικότητας	7550	daN/mm ²
Διατομή	198	mm ²
Στρώμα πάγου	0	mm
Συντελεστής θερμικής διαστολής	19.2*10 ⁻⁶	1/°C

Νέο βέλος κάμψης 11,75 m

Υπολογισμός



Χαρακτηριστικά αρχικής τέντωσης

Μήκος ανοίγματος	380	m
Θερμοκρασία	50	°C
Βέλος κάμψης	12	m
Υψομετρική διαφορά	29	m
Απόσταση από πρώτο πυλώνα	191.82	m

Σχήμα I.2.-1: Στιγμιότυπο του προγράμματος υπολογισμού του βέλους κάμψεως.

Το νέο βέλος κάμψεως είναι ίσο προς 11,75 m.

Παράρτημα II. Δυο προγράμματα υπολογισμού της αύξησης θερμοκρασίας αγωγών εναερίων δικτύων μεταφοράς και διανομής

Για τη θερμική συμπεριφορά των επίμαχων αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα χρειάζεται να υπολογισθεί το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης. Επειδή ο ακριβής υπολογισμός του εν λόγω ρεύματος είναι υπερβολικά δύσκολος, η τιμή του για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας βρίσκεται στην πράξη με δύο μεθόδους:

- την προσεγγιστική μέθοδο, και
- τον υπολογισμό μέσω των αντιστάσεων μέχρι και τον μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης.

Η υπολογιζόμενη τιμή του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης μέσω των δύο αυτών μεθόδων είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την πραγματική τιμή, γιατί στην 1^η περίπτωση δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι αντιστάσεις του κυκλώματος και στη 2^η περίπτωση η συνολική αντίσταση είναι μικρότερη από την πραγματική. Γι' αυτό, η υπολογιζόμενη θερμοκρασία με τις δύο αυτές μεθόδους είναι τελικά μεγαλύτερη από την πραγματικά αναπτυσσόμενη κατά το βραχυκύκλωμα, και μάλιστα η πιο μεγάλη τιμή υπολογίζεται με την προσεγγιστική μέθοδο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι γραμμές μεταφοράς δεν προστατεύονται από διακόπτες αυτόματης επαναφοράς. Για αυτό τον λόγο έχουν δημιουργηθεί δυο προγράμματα: ένα για τις γραμμές μεταφοράς, και ένα για τις γραμμές διανομής.

Στο Παράρτημα αυτό, παρουσιάζονται δυο προγράμματα για τον υπολογισμό της αύξησης θερμοκρασίας αγωγών διανομής και μεταφοράς από βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με την προσεγγιστική μέθοδο, και η αύξηση της θερμοκρασίας υπολογίζεται σύμφωνα με την μεθοδολογία κατά AEG [116]:

$$\Delta\theta = k I_{sc}^2 \left(t + T \left(I_{sc}'' / I_{sc} \right)^2 \right) / A^2 \quad (\text{II.-1})$$

όπου $k_{cu} = 0,0058$ και $k_{Al} = 0,0135$, I_{sc} το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης, t ο χρόνος διακοπής, T ένας συντελεστής (που κατά το τριπολικό βραχυκύκλωμα έχει την

μέγιστη τιμή $T_{max} = 0,3$), I''_{sc} το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, και A η διατομή του αγωγού.

1. Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως

Σύμφωνα με την προσεγγιστική μέθοδο ισχύει για το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$I''_{sc} \leq 100 I_N / u_k \quad (\text{II.1.-1})$$

Το ονομαστικό ρεύμα I_N και η σχετική τάση βραχυκύκλωσης u_k στην παραπάνω ανισότητα αφορούν τον μετασχηματιστή προ της θέσης βραχυκύκλωσης. Δεν λαμβάνονται δηλαδή υπόψη οι αντιστάσεις της διαδρομής βραχυκύκλωσης, σαν να πρόκειται για βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή μεταφοράς. Οι υπολογιζόμενες τιμές είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές, όσο αυξάνει η θέση βραχυκύκλωσης από την πηγή. Στη συνέχεια, ο υπολογισμός του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης δίδεται από την σχέση:

$$I_{sc} = \mu_d I''_{sc} \quad (\text{II.1.-2})$$

όπου μ_d ένας συντελεστής που βρίσκεται προσεγγιστικά από τον πίνακα II.1-1 αναλόγως του λόγου I''_{sc} / I_N . Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου, εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή.

I''_{sc} / I_N	μ_d	I''_{sc} / I_N	μ_d	I''_{sc} / I_N	μ_d
0,1	1,00	0,8	0,85	5,0	0,49
0,2	0,97	0,9	0,82	6,0	0,44
0,3	0,96	1,0	0,80	7,0	0,41
0,4	0,93	1,6	0,70	8,0	0,40
0,5	0,90	2,0	0,67	9,0	0,39
0,6	0,89	3,0	0,58	10,0	0,35
0,7	0,87	4,0	0,52		

Πίνακας II.1-1: Τιμές του συντελεστή μ_d , αναλόγως του λόγου I''_{sc} / I_N

2. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος υπολογισμού αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών δικτύων μεταφοράς

Στην συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς 150 kV. Η ισχύς του μετασχηματιστή ανάντη του σημείου του βραχυκυκλώματος είναι 350 MVA, και η σχετική τάση βραχυκυκλώσεως είναι 22%. Ο χρόνος διακοπής θεωρείται ίσος προς 1 s. Οι αγωγοί της γραμμής είναι ACSR Linnet (τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον πίνακα I.2.-1). Στιγμιότυπο του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα Π.2.-1.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κωνσταντίνου Χαλεβίδη υπό την επίβλεψη του ομότιμου καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα

Υπολογισμός αύξησης θερμοκρασίας αγωγών εναερίων δικτύων μεταφοράς

Παράμετροι γραμμής μέσης τάσης

Ισχύς μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ:	<input type="text" value="350"/>	MVA
Σχετική τάση βραχυκύκλωσης:	<input type="text" value="22"/>	%
Ονομαστική τάση:	<input type="text" value="150"/>	kV
Χρόνος διακοπής:	<input type="text" value="1"/>	s

Είδος αγωγού:

Ευθέρας περιβάλλοντος

Θερμοκρασία περιβάλλοντος:	<input type="text" value="40"/>	°C
----------------------------	---------------------------------	----

Αποτελέσματα

Τελική θερμοκρασία αγωγού:	64,31	°C
----------------------------	-------	----

Σχήμα Π.2.-1: Στιγμιότυπο του προγράμματος υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών γραμμής μεταφοράς.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού είναι ίση προς 24,31 °C.

3. Παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος υπολογισμού αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών δικτύων διανομής από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς

Στην συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών μιας γραμμής διανομής 20 kV. Η ισχύς του μετασχηματιστή ανάντη του σημείου του βραχυκυκλώματος είναι 50 MVA, και η σχετική τάση βραχυκυκλώσεως είναι 20%. Ο χρόνος διακοπής θεωρείται ίσος προς 0,1 s, ενώ ο χρόνος μεταξύ διακοπής και επαναφοράς θεωρείται ίσος προς 5 s. Οι αγωγοί της γραμμής είναι ACSR 95 mm². Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται ίση προς 13,8 m/s (6 στην κλίμακα Beaufort). Στιγμιότυπο του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα Π.3.-1.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κωνσταντίνου Χαλεβιδή
υπό την επίβλεψη του ομότιμου καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα

Υπολογισμός αύξησης θερμοκρασίας αγωγών εναερίων δικτύων από τους κύκλους λειτουργίας διακόπτη αυτόματης επαναφοράς

Παράμετροι γραμμής μέσης τάσης

Ισχύς μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ:	<input type="text" value="50"/>	MVA
Σχετική τάση βραχυκύκλωσης:	<input type="text" value="20"/>	%
Ονομαστική τάση:	<input type="text" value="20"/>	kV
Χρόνος διακοπής:	<input type="text" value="0.1"/>	s
Χρόνος μεταξύ διακοπής και επαναφοράς:	<input type="text" value="5"/>	s
Είδος αγωγού:	<input type="text" value="ACSR 95 τ.χ."/>	

Συνθήκες περιβάλλοντος

Θερμοκρασία περιβάλλοντος:	<input type="text" value="40"/>	
Ταχύτητα ανέμου:	<input type="text" value="13.8"/>	m/s

Εκτέλεση

Αποτελέσματα

Τελική θερμοκρασία αγωγού:	157.733
Τελική θερμοκρασία αγωγού λαμβάνοντας υπ' όψιν την ψύξη των αγωγών:	150.81

Σχήμα Π.3.-1: Στιγμιότυπο του προγράμματος υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας αγωγών γραμμής διανομής από τους κύκλους λειτουργίας διακόπτη αυτόματης επαναφοράς.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού είναι ίση προς 150,81 °C.

Βιβλιογραφία

- [1] Π. Μπούρκας, *Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
- [2] Π. Δ. Μπούρκας; and Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος, *Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε. Μ. Πολυτεχνείου, 2003.
- [3] Π. Δ. Μπούρκας, *Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων*. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 1998.
- [4] C. G. Karagiannopoulos, *et al.*, "Physical interpretations concerning non-linear conductivity phenomena across no-load switching contacts," *IEE Trans. on Compon., Hybrids, and Manuf. Tech.*, vol. 14, pp. 137-141, 1991.
- [5] Φ. 608/Β/6.10.1967, "Περί εγκρίσεως Κανονισμών δια την εγκατάστασιν και συντήρησιν Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας," ed, 1967.
- [6] J. Haakana, *et al.*, "Comparison of Reliability Indices from the Perspective of Network Automation Devices," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1547-1555, 2010.
- [7] R. M. Cheney, *et al.*, "Distribution single-phase tripping and reclosing: Overcoming obstacles with programmable recloser controls," in *Power Systems Conference, 2009. PSC '09*, 2009, pp. 1-10.
- [8] J. M. Gers; and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [9] S. Grzybowski; and T. Disyadej, "Electrical performance of fiberglass crossarm in distribution and transmission lines," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, 2008, pp. 1-5.
- [10] V. W. K. Ho;, *et al.*, "Effects of Surface Decay on Remaining Strength of Transmission-Line Wood Cross-arms," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 419-424, 2008.
- [11] J. R. Stack;, *et al.*, "Estimation of wooden cross-arm integrity using artificial neural networks and laser vibrometry," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 1539-1544, 2003.
- [12] IEEE, "Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors," ed. New York, 2006.

- [13] B. Wareing, *Wood Pole Overhead Lines*: IET Publishing, 2005.
- [14] H. A. Smolleck and J. P. Sims, "Guidelines for the selection and operation of bare ACSR conductors with regard to current-carrying capacity," *Electric Power Systems Research*, vol. 5, pp. 179-190, 1982.
- [15] F. Jakl and A. Jakl, "Effect of elevated temperatures on mechanical properties of overhead conductors under steady state and short-circuit conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 242-246, 2000.
- [16] A. Piccolo, *et al.*, "Thermal rating assessment of overhead lines by Affine Arithmetic," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 275-283, 2004.
- [17] V. T. Morgan, "The thermal rating of overhead-line conductors Part I. The steady-state thermal model," *Electric Power Systems Research*, vol. 5, pp. 119-139, 1982.
- [18] CIGRE, "Technical Brochure Ref. 207 - Thermal Behaviour of Overhead Conductors," ed, 2002.
- [19] F. Jiao, *et al.*, "Partial least squares modelling for dynamic overhead line ratings," in *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, 2011, pp. 1-6.
- [20] IEEE, "IEEE Standard 738," in *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*, ed, 2006.
- [21] J. Black, *et al.*, "Equipment and methodology for the planning and implementation of dynamic line ratings on overhead transmission circuits," in *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, 2010, pp. 1-6.
- [22] T. Yip, *et al.*, "Dynamic line rating protection for wind farm connections," in *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, 2009, pp. 1-5.
- [23] "IEC Standard 865-1, Short-circuit current – Calculation of effects," ed, 1993.
- [24] "IEC Standard 60909, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems," ed, 2002.
- [25] L. Song-Bo, "Calculation of the Steady-State and Transient Temperature Rises of Round Cable Bundles," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1229-1235, 2010.
- [26] M. Tartaglia and M. Mitolo, "An Analytical Evaluation of the Prospective I_{2t} to Assess Short-Circuit Capabilities of Cables and Busways," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1334-1339, 2010.

- [27] A. D. Polykrati, *et al.*, "Thermal effect on electric power network components under short-circuit currents," *Electric Power Systems Research*, vol. 72, pp. 261-267, 2004.
- [28] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return," *Bell System Technical Journal*, 1926.
- [29] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: IEEE, 1995.
- [30] L. L. Grigsby, Ed., *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*. CRC Press, 2006, p.^pp. Pages.
- [31] W. H. Kersting and R. K. Green, "The application of Carson's equation to the steady-state analysis of distribution feeders," in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, 2011, pp. 1-6.
- [32] R. M. F. Ciric, A.P.; Ochoa, L.F., "Power flow in four-wire distribution networks-general approach " *Power Systems, IEEE Transactions on* vol. 18, pp. 1283-1290, 2003.
- [33] L. Antonio Carlos Siqueira de and P. Carlos, "Inclusion of Frequency-Dependent Soil Parameters in Transmission-Line Modeling," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 492-499, 2007.
- [34] F. A. Uribe, "Accurate modeling of underground cable earth impedances for electromagnetic transients," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, 2006, p. 6 pp.
- [35] J. Horak, "Zero Sequence Impedance of Overhead Transmission Lines," Basler Electric.
- [36] R. Horton, *et al.*, "Effect of line modeling methods on neutral-to-earth voltage analysis of multi-grounded distribution feeders," in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, 2011, pp. 1-6.
- [37] C. Jehn-Yih and R. J. Chang, "Field experience with overhead distribution equipment under severe contamination," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 1640-1645, 1996.
- [38] F. Amarrh, *et al.*, "Linear stochastic analysis of polluted insulator leakage current," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1063-1069, 2002.
- [39] I. A. Metwally, *et al.*, "Performance improvement of 33 kV line-post insulators in harsh environment," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 778-785, 2006.

- [40] R. Filter, "The Influence of Wood Pole Preservatives on Wood Fire and Electrical Safety," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-103, pp. 3089-3095, 1984.
- [41] K. L. Wong, *et al.*, "Aging effect on leakage current flow in wooden poles," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 133-138, 2009.
- [42] M. F. Rahmat and K. L. Wong, "Thermographic study of stainless steel cross-arm on overhead distribution system," in *Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities*, 2009, pp. 1-6.
- [43] R. Filter and J. D. Mintz, "An improved 60 Hz wood pole model," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 442-448, 1990.
- [44] K. L. Wong and M. F. Rahmat, "Study of Leakage Current Distribution in Wooden Pole Using Ladder Network Model," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 995-1000, 2010.
- [45] K. L. Wong and M. F. Rahmat, "Feasibility Study of Leakage Current Shunting Method Based on the Ladder Network Model," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1133-1137, 2010.
- [46] M. Darveniza, *Electrical Properties of Wood and Line Design*: University of Queensland Press, 1978.
- [47] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1920.
- [48] W. S. Zaengl; and N. U. Nyffenegger, presented at the Proc. 3rd Int. Conf. on Gas Discharges, 1974.
- [49] E. Kuffel;, *et al.*, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Oxford: Newnes, 2000.
- [50] L. Jie, *et al.*, "Analysis of Electric Field, Ion Flow Density, and Corona Loss of Same-Tower Double-Circuit HVDC Lines Using Improved FEM," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 482-483, 2009.
- [51] T. Takuma, *et al.*, "Calculation of ION Flow Fields of HVDC Transmission Lines By the Finite Element Method," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-100, pp. 4802-4810, 1981.
- [52] Z. M. Al-Hamouz, "Corona power loss, electric field, and current density profiles in bundled horizontal and vertical bipolar conductors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 1182-1189, 2002.

- [53] Z. Xiangxian, *et al.*, "Spatial Distribution of Ion Current Around HVDC Bundle Conductors," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 380-390, 2012.
- [54] P. Sattari, *et al.*, "FEM-FCT-Based Dynamic Simulation of Corona Discharge in Point-Plane Configuration," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1699-1706, 2010.
- [55] "A review of current knowledge: Polluted Insulators," *CIGRE WG 33-04 Taskforce 01*, 1998.
- [56] E.-H. Ayman H, "Leakage current characterization for estimating the conditions of non-ceramic insulators' surfaces," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 379-384, 2007.
- [57] A. H. El-Hag, *et al.*, "Prediction of leakage current of non-ceramic insulators in early aging period," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1686-1692, 2008.
- [58] M. A. Douar, *et al.*, "Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under non-uniform pollution conditions," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1284-1297, 2010.
- [59] M. Al-Dabbagh and S. Pathak, "Leakage Current Estimation of H.V Insulators On Power Distribution Lines," in *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10*, 2005, pp. 1-4.
- [60] S. M. Gubanski, "Modern outdoor insulation - concerns and challenges," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 21, pp. 5-11, 2005.
- [61] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [62] T. Kikuchi, *et al.*, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 548-556, 1999.
- [63] A. H. El-Hag, *et al.*, "Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicone rubber in salt-fog," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 128-136, 2003.

- [64] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, "Leakage currents on non-ceramic insulators and materials," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 660-667, 1999.
- [65] N. Vasudev, *et al.*, "Long term ageing performance of Silicone rubber insulators under different conditions," in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009. ICPADM 2009. IEEE 9th International Conference on the*, 2009, pp. 276-280.
- [66] Z. Tiebin and R. A. Bernstorf, "Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 14, pp. 26-33, 1998.
- [67] R. J. Chang and L. Mazeika, "Analysis of electrical activity associated with inclined-plane tracking and erosion of insulating materials," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp. 394-400, 2000.
- [68] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, "Ageing of silicone rubber insulators in coastal and inland tropical environment," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 326-333, 2010.
- [69] Suwarno, "Silicone compound coating on ceramics insulators under various environmental conditions," in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on*, 2003, pp. 1015-1018 vol.3.
- [70] Suwarno and F. Pratomosiwi, "Application of RTV Silicone Rubber coating for improving performances of ceramic outdoor insulator under polluted condition," in *Electrical Engineering and Informatics, 2009. ICEEI '09. International Conference on*, 2009, pp. 581-587.
- [71] D. Devendranath, *et al.*, "Leakage current and charge in RTV coated insulators under pollution conditions," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 294-299, 2002.
- [72] IEC, "TR 60815: Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions," ed, 1986.
- [73] IEC60071, "Insulation co-ordination ", ed, 1996.
- [74] ΔΕΗ, "Κανονισμός ΟΔ-22/ΔΕΔ-ΤΤΕ Δ-4/ 4-7-88 ", ed.
- [75] E. G. Psarros, *et al.*, "A Model for Calculating the Temperature of Aluminium Particles Ejected from Overhead Low-voltage Lines owing to a Short-Circuit," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, pp. 722-726, 2009.

- [76] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, 2nd ed.: McGraw-Hill, 1996.
- [77] Π. Τριβέλλας, *Μυστικά για το σωστό φυσίγγι: Τύπος Κυνήγι και Ψάρεμα*.
- [78] (01/06/2005). *Κυνήγι στην Ελλάδα-Hunter.gr*. Available: <http://www.hunter.gr/>
- [79] Β. Σελούντος, *et al.*, *Πυρασφάλεια, εφαρμοσμένη πυροπροστασία και στοιχεία πυρόσβεσης*. Αθήνα: Εκδόσεις Φοίβος, 1998.
- [80] A. E. Cote, *Fire Protection Handbook*: National Fire Protection Association, 1992.
- [81] V. Babrauskas, *Ignition Handbook*: Fire Science Publishers and Society of Fire Protection Engineers, 2003.
- [82] S. L. Chen, *et al.*, "High-temperature ampacity model for overhead conductors," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1136-1141, 2002.
- [83] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Ranton: CRC Press, 1994.
- [84] F. L. R. Vidor, *et al.*, "Inspection of Wooden Poles in Electrical Power Distribution Networks in Southern Brazil," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 479-484, 2010.
- [85] IEC60364-1, "Electrical Installations for Buildings," 2005.
- [86] J. H. A. Robert, J. Van Waes, J. Michaud, T. Niemand, Y. Rajotte, "Round Table on Neutral Earthing in LV Networks," in *CIREN*, 2001.
- [87] L. Sainz, *et al.*, "Study of neutral conductor current in three-phase networks with single-phase converters," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1466-1476, 2006.
- [88] J. J. M. Desmet, *et al.*, "Analysis of the neutral conductor current in a three-phase supplied network with nonlinear single-phase loads," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 587-593, 2003.
- [89] D. P. Stojanovic, *et al.*, "Measurement and analysis of neutral conductor current in low voltage distribution network," in *EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE*, 2009, pp. 1481-1486.
- [90] J. R. Acharya, *et al.*, "Temporary Overvoltage and GPR Characteristics of Distribution Feeders With Multigrounded Neutral," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1036-1044, 2010.

- [91] A. Augugliaro, *et al.*, "A modified backward/forward method for fast solving radial distribution networks," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, 2003, p. 7 pp. Vol.2.
- [92] W. Zhuding, *et al.*, "Implementing transformer nodal admittance matrices into backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1831-1836, 2004.
- [93] T. Jen-Hao and C. Chuo-Yean, "Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method for Distribution Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1665-1672, 2007.
- [94] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 822-827, 2002.
- [95] R. Dugan, *et al.*, "Neutral-to-Earth Voltage (NEV) Test Case," April 2010.
- [96] D. Penido, *et al.*, "Solving the NEV test case using the current injection full-newton power flow," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. IEEE/PES*, 2008, pp. 1-7.
- [97] D. Penido, *et al.*, "Solving the single-circuit NEV test case using the current injection full-newton power flow," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-7.
- [98] T. O. Rouse, "Mineral insulating oil in transformers," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 14, pp. 6-16, 1998.
- [99] R. Sarathi and G. Koperundevi, "Investigation of partial discharge activity of single conducting particle in transformer oil under DC voltages using UHF technique," *Science, Measurement & Technology, IET*, vol. 3, pp. 325-333, 2009.
- [100] S. Birlasekaran, "The movement of a conducting particle in transformer oil in AC fields," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 9-17, 1993.
- [101] S. N. Hettiwatte, *et al.*, "Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge," *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, vol. 152, pp. 25-30, 2005.

- [102] B. C. Lesieutre, *et al.*, "An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 249-256, 1997.
- [103] B. Suechoey, *et al.*, "An analysis of temperature and pressure on loading oil-immersed distribution transformer," in *Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th International*, 2005, pp. 634-638 Vol. 2.
- [104] C. Yeckel, *et al.*, "A Comparison Of The AC Breakdown Strength Of New And Used Poly-α Olefin Coolant," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 820-824, 2007.
- [105] V. M. Atrazhev, *et al.*, "Mechanisms of Impulse Breakdown in Liquid: The Role of Joule Heating and Formation of Gas Cavities," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 2644-2651, 2010.
- [106] I. Fofana, *et al.*, "Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 1040-1047, 2001.
- [107] J. T. Park and K.-H. Chang, "Application of statistics to oil density measurement," *Measurement*, vol. 30, pp. 95-103, 2001.
- [108] M. Butcher, *et al.*, "Conduction and breakdown mechanisms in transformer oil," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 34, pp. 467-475, 2006.
- [109] E. I. Koufakis, *et al.*, "Thermal coefficient measurements of the insulation in distribution transformers of a 20#x0;kv network," *Measurement*, vol. 41, pp. 10-19, 2008.
- [110] T. K. Saha and P. Purkait, "Investigations of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 252-260, 2008.
- [111] C. D. Paraskevas, *et al.*, "Temperature dependent dielectric spectroscopy in frequency domain of high-voltage transformer oils compared to physicochemical results," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 539-546, 2006.
- [112] I. Fofana, *et al.*, "On the frequency domain dielectric response of oil-paper insulation at low temperatures," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 799-807, 2010.

- [113] W. Xiaodong, *et al.*, "Acoustic energy shifting in transformer oil at different temperatures," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 2356-2357, 2005.
- [114] H. Philippow, *Taschenbuch Electrotechnik Band 2*. Berlin, 1966.
- [115] C. Avril, *Construction des Lignes Aeriennes a haute Tension*. Paris: Editions Eyrolles, 1974.
- [116] AEG, *Hilfsbuch für elektrische Licht und Kraft – Anlagen*. Essen: Verlag W. Girardet, 1957.