

**ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

***ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ
ΕΝΑΝΤΙ ΚΕΡΑΥΝΩΝ***

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ:

**ΚΑΤΣΙΦΑΡΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ- ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ
ΙΩΑΝΝΑ**

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ: ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ - ΔΡΟΣΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΜΑΙΟΣ 2014



Περιεχόμενα

Πρόλογος	4
Ευχαριστίες	6
Κεφάλαιο 1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) και μοντέλα προσομοίωσης	7
1.1 Γενικά στοιχεία	7
1.2 Οι απαρχές της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου.....	9
1.3 Ο αλγόριθμος Yee.....	9
1.3.1 Οι εξισώσεις FDTD για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.....	12
1.3.2 Ακρίβεια και σταθερότητα.....	14
1.4 Μοντελοποίηση και προσομοίωση με την χρήση της μεθόδου FDTD.....	15
1.4.1 Η μοντελοποιημένη κατασκευή	16
1.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	19
1.4.3 Συμπεράσματα.....	22
1.5 Προσομοίωση μεταβατικών τάσεων των εφεδρικών δικτύων ενέργειας μιας μεγάλης εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της άμεσης πρόσπτωσης κεραυνού στην εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης.....	23
1.5.1 Προσδιορισμός της πηγής της βλάβης.....	24
1.5.2 Προσδιορισμός μιας τυπικής διάταξης μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
1.5.3 Υψίσυχνα μοντέλα για τα στοιχεία του εφεδρικού ηλεκτρικού δικτύου.....	27
1.5.3.1 Η εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης.....	28
1.5.3.2 Πυλώνες και μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.....	29
1.5.3.3 Συστήματα γείωσης και αντιστάσεις γείωσης.....	31
1.5.3.4 Αναστολείς υπέρτασης	32
1.5.3.5 Μετασχηματιστές	35
1.5.3.6 Αγωγοί.....	38
1.5.3.7 Γεννήτριες και κινητήρες	38
1.5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης	39
Κεφάλαιο 2. Αναχαίτιση κεραυνού και προστασία εναέριων γραμμών μεταφοράς	43
2.1 Πιθανότητα αναχαίτισης κεραυνού και απόδοση προστασίας εναέριων γραμμών μεταφοράς.....	43

2.2	Ανάλυση προστασίας βάσει στατιστικού μοντέλου.....	44
2.3	Μεθοδολογία για τον υπολογισμό του ρυθμού των σφαλμάτων προστασίας.....	54
2.4	Υπολογισμοί SFFOR και συζήτηση.....	57
2.5	Προστασία εναέριων γραμμών από κεραυνούς με την χρήση απαγωγέων πολυθαλάμων και μονωτήρων.....	62
2.6	Το σύστημα «πολυθαλάμων»	64
2.6.1	Αρχή λειτουργίας MCS.....	64
2.6.2	Πειραματικά δεδομένα και διαδικασίες δοκιμών.....	65
2.6.3	Αποτελέσματα δοκιμών.....	69
2.7	Απαγωγείς «πολυθαλάμων» (Multi-chamber arresters – MCA).....	73
2.7.1	MCA 10-20 kV.....	73
2.7.2	MCA – 35 kV.....	77
2.8	Απαγωγείς «πολυθαλάμων» μονωτήρων (Multi-chamber insulator arresters – MCIA)	79
2.9	Η επίδραση της αποτροπής θετικής επαγόμενης τάσης σε εναέριους αγωγούς από άμεσα πλήγματα κεραυνών	85
2.10	Μοντελοποίηση διαδικασίας κεραυνικών προσπτώσεων.....	88
2.11	Μοντελοποίηση της απόδοσης της corona σε αγωγό αποτροπής επαγόμενης τάσης	89
2.11.1	Σταθερότητα της ζώνης ηλεκτρικής φόρτισης.....	94
2.11.2	Χωρικό δυναμικό επαγόμενο από εκκένωση corona.....	95
2.12	Αποτελέσματα μοντέλων.....	97
2.12.1	Η σημασία της ζώνης του θετικού οδηγού.....	97
2.12.2	Μοντελοποίηση της ζώνης εκκένωσης corona	99
2.12.3	Σταθερότητα της χωρικής ζώνης φόρτισης	105
2.12.4	Έκθεση σε κεραυνούς των αγωγών αποτροπής επαγόμενης τάσης.....	107
2.12.5	Μηχανισμός προστασίας εδαφικού καλωδίου αποτροπής επαγόμενης τάσης	108
2.12.6	Τεχνικές αποτροπής επαγόμενης τάσης.....	111
Κεφάλαιο 3. Αλληλεπίδραση μεταξύ κεραυνικής εκκένωσης και ηλεκτρικού πυλώνα		114
3.1	Γενικά στοιχεία	114

3.2	Μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μιας κεραυνικής εκκένωσης και ενός πυλώνα	114
3.2.1	Ανάλυση ακτινικού δικτύου στο πεδίο του χρόνου με την θεωρία των γραμμών	115
3.2.1.1	Απεικόνιση της γραμμής στο πεδίο του χρόνου με ένα τετράπολο	117
3.2.1.2	Κατασκευή των υποπινάκων [A1] και [A2]	121
3.2.1.3	Κατασκευή των υποπινάκων [B1] και [B2]	122
3.2.1.4	Κατασκευή του αγνώστου διανύσματος [X]	123
3.3	Τεκμηρίωση	123
3.3.1	Ανάλυση επιπτώσεων της άμεσης εκκενώσεως κεραυνού σε έναν πυλώνα	123
3.3.2	Ανάλυση επιπτώσεων της έμμεσης εκκενώσεως κεραυνού σε έναν πυλώνα	126
	Κεφάλαιο 4. Σύνοψη – Συμπεράσματα	129
	Βιβλιογραφία	133

Πρόλογος

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς εναερίων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης έναντι κεραυνών. Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain – FDTD), η οποία αποτελεί μια από τις κυριότερες μεθόδους υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού, προκειμένου να καθοριστεί η μελέτη των μεταβατικών υπερτάσεων που εμφανίζονται λόγω κεραυνικών πλήγμάτων σε έναν πυλώνα.

Η δομή της πτυχιακής εργασίας έχει ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση σχετικά με τις ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, τους κεραυνούς, τα χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο λειτουργίας τους. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain – FDTD) και ο αλγόριθμος Yee, του οποίου κύρια βάση είναι η γεωμετρική κατανομή ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, αντιπροσωπεύοντας τις ολοκληρωματικές και διαφορικές μορφές των εξισώσεων Maxwell. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται εφαρμογή της μεθόδου FDTD, χρησιμοποιώντας σαν μοντέλο προσομοίωσης εκκένωσης κεραυνού έναν πυλώνα διανομής. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης του απαιτούμενου εργαλείου προσομοίωσης, τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν αλλά και τα σημαντικότερα αποτελέσματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται το ενδεχόμενο αναχαίτισης κεραυνού και συγκεκριμένα διερευνώνται τα σφάλματα που προκύπτουν σε μια γραμμή μεταφοράς. Μια κεραυνική εκκένωση μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις σε μια Γραμμή Μεταφοράς Υψηλής Τάσης είτε πλήττοντας απευθείας τους

αγωγούς φάσης (σφάλμα θωράκισης) είτε πλήττοντας τον πυλώνα ή τους αγωγούς προστασίας (ανάστροφη διάσπαση). Στην προσπάθεια απόδοσης της προστασίας των εναερίων γραμμών ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενες βλάβες και διαταραχές, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στηρίζεται στο πρότυπο IEEE Standard 1243:1997 και σε ηλεκτρομαγνητικά μοντέλα προστασίας. Στην συνέχεια του δευτέρου κεφαλαίου εξετάζονται δύο μελέτες περιπτώσεων που σχετίζονται με την προστασία των γραμμών. Η πρώτη από αυτές αφορά στην προστασία των εναερίων γραμμών από κεραυνούς με την χρήση απαγωγέων πολυθαλάμων και μονωτήρων, ενώ η δεύτερη πραγματεύεται το αντικείμενο της επίδρασης της αποτροπής θετικής επαγόμενης τάσης σε εναέριους αγωγούς από άμεσα πλήγματα κεραυνών.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με την αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ένα κεραυνό και έναν ηλεκτρικό πυλώνα. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσα από τον προσδιορισμό των γραμμών μεταφοράς ενώ η αριθμητική λύση δίνεται με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD).

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται μια σύνοψη της εργασίας, με εστίαση στα βασικά σημεία και τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση που προηγήθηκε.

Ευχαριστίες

Η αρχική κατανόηση του θέματος και εν συνέχεια η μελέτη του ήταν αρκετά δύσκολη. Για την συγγραφή της εργασίας χρειάστηκαν ατελείωτες ώρες για τη συλλογή των πληροφοριών. Η άντληση του υλικού για την συγγραφή της προέρχεται από τη βιβλιογραφία που αναφέρεται στο τέλος της εργασίας .Σ' αυτό το δύσκολο εγχείρημα της κατανόησης ,οι επεξηγήσεις και η καθοδήγηση της εισηγήτριας καθηγήτριας Πυργιώτη Ελευθερία ήταν ιδιαίτερα πολύτιμες και εποικοδομητικές για την εξέλιξη της εργασίας .Θα θέλαμε να την ευχαριστήσουμε θερμά για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση της .

Στην επεξήγηση πολλών αποριών συνέβαλλαν με τις γνώσεις και την εμπειρία τους οι: Παπαδά Βασιλική, προϊσταμένη του τμήματος Ηλεκτροδότησης της εταιρείας ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε., Βαρθολομαίος Αντώνιος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός επιβλέπων Συντήρησης του τμήματος Ηλεκτροδότησης, Κατσής Γεώργιος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός επιβλέπων Συντήρησης του τμήματος Ηλεκτροδότησης, οι τεχνικοί Ζαχαρής Χρήστος, Καλλιντεράκης Μανώλης , Κάπρος Γεράσιμος , Λεβεντούρης Θεόδωρος , Καρύδης Σπύρος και Κρικώνης Μιχάλης. Επίσης τις θερμότερες ευχαριστίες μας στην Αδάμου Στεφάνια Μηχανικό τεχνικής Υποστήριξης της Υπηρεσίας Σηματοδότησης και στον Αλεξίου Δημήτριο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, επιβλέπων Συντήρησης του τμήματος Ηλεκτροδότησης που μας έδειξε τεράστια πνευματική γενναιοδωρία και προσέφερε απλόχερα τον πολύτιμο χρόνο του.

Κεφάλαιο 1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) και μοντέλα προσομοίωσης

1.1 Γενικά στοιχεία

Στις μέρες μας, οι εταιρίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ως απώτερο σκοπό την αποφυγή απροσδόκητων διακοπών της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι γραμμές μεταφοράς, που είναι υπεύθυνες για την διασύνδεση των εγκαταστάσεων παραγωγής με τα κέντρα φορτίου, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας υποβάλλονται σε πολλές περιβαλλοντολογικές καταπονήσεις. Μια από αυτές τις καταπονήσεις είναι η ατμοσφαιρική εκκένωση ή το κεραυνικό πλήγμα.

Όταν ο εξοπλισμός των συστημάτων ισχύος υπόκειται σε καταπονήσεις που σχετίζονται με ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, εμφανίζονται ως επακόλουθα υψηλά επίπεδα επαγόμενης τάσης σε όλο το σύστημα. Επομένως, τέτοιες εκκενώσεις μπορεί να πλήξουν άμεσα τον εξοπλισμό ή τις γραμμές μεταφοράς, δημιουργώντας κρουστικές υπερτάσεις αρκετά υψηλές, ώστε να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στην μόνωση του εξοπλισμού και τελικά να οδηγήσουν σε απροσδόκητες διακοπές λειτουργίας. Είναι σημαντικό, συνεπώς, να γνωρίζουμε πώς συμπεριφέρεται η γραμμή, όταν υποβάλλεται σε τέτοια υπερφόρτιση, προκειμένου να σχεδιαστεί η μόνωση που θα αντέχει τέτοια καταπόνηση.

Η πιθανότητα να πλήξει ένας κεραυνός έναν υποσταθμό είναι μικρή διότι το σύστημα προστασίας του υποσταθμού, που αποτελείται από ιστούς και αγωγούς προστασίας, παρέχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο προστασίας για τον εξοπλισμό και τους αγωγούς. Από την άλλη πλευρά, οι γραμμές μεταφοράς είναι πιο ευάλωτες σε ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, διότι διατρέχουν μεγάλες

αποστάσεις και επειδή είναι γενικώς οι υψηλότερες κατασκευές στην περιοχή στην οποία βρίσκονται. Συνεπώς είναι λογικό οι μελέτες πρόσπτωσης ατμοσφαιρικών εκκενώσεων να επικεντρώνονται κυρίως στις γραμμές μεταφοράς. Ειδικότερα, τα περιστατικά πρόσπτωσης κεραυνών σε πυλώνες είναι πιο πιθανά, διότι οι τελευταίοι είναι συνήθως οι υψηλότερες κατασκευές κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Όταν ο κεραυνός, λοιπόν, πλήξει τον πυλώνα, το ρεύμα διατρέχει κατά μήκος του πυλώνα και της αντίστασης γείωσης πριν εκτονωθεί. Παρότι η αντοχή της μόνωσης είναι η πιο σημαντική παράμετρος στην ανάλυση της απόδοσης και προστασίας ενός συστήματος ενέργειας, η γνώση της τάσεως που αναπτύσσεται κατά μήκος της είναι πρωτίστης σημασίας. Ωστόσο, η εκτίμηση της τάσεως κατά μήκος του μονωτήρα δεν είναι εύκολη διότι δεν υπάρχει ομοφωνία για το πώς μοντελοποιείται ένας πυλώνας.

Η αριθμητική ανάλυση είναι μια καλή εναλλακτική για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, διότι μπορεί να απεικονίσει τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με την ακρίβεια που απαιτείται για αυτό τον σκοπό. Στο ίδιο μήκος κύματος, η αριθμητική προσομοίωση είναι ένα εργαλείο που βοηθά τους μηχανικούς να γνωρίσουν καλύτερα πώς συμπεριφέρεται ένα σύστημα μεταφοράς αφού πληγεί από κεραυνό. Στο πεδίο αυτό έχει συμβάλει καθοριστικά η μέθοδος επίλυσης των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain - FDTD), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατεύθυνση προσδιορισμού της τάσης σε μια σειρά μονωτήρων όταν ένας κεραυνός πλήξει τον πυλώνα ή την γραμμή.

1.2 Οι απαρχές της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου

Η κλασική δημοσίευση του Yee το 1966 εισάγει μια τεχνική, η οποία είναι ικανή να λύσει αριθμητικά τις εξισώσεις Maxwell με έναν άμεσο, απλό και κομψό τρόπο στο πεδίο του χρόνου. Αυτή η μέθοδος (μέθοδος επίλυσης των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου - Finite Difference Time Domain - FDTD) βασίζεται στην διακριτή γεωμετρική κατανομή των συνιστωσών των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, με τρόπο που να ικανοποιεί τις διαφορικές και ολοκληρωτικές μορφές αυτών των εξισώσεων. Εκτός αυτού, οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου είναι πάντα μετατοπισμένες κατά μισή χρονική απόσταση από τις συνιστώσες του γειτονικού μαγνητικού πεδίου, με τρόπο που να ικανοποιούνται οι χρονικές παράγωγοι που σχετίζονται με την χωρική κατανομή που αναφέρθηκε προηγουμένως. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται προβλήματα με την αναστροφή των πινάκων των στοιχειωδών κυκλωμάτων και έτσι δημιουργείται μια ισχυρή μέθοδος.

1.3 Ο αλγόριθμος Yee

Οι εξισώσεις Maxwell ελέγχουν την ηλεκτρομαγνητική μετάδοση στα ισοτροπικά και μη κατανεμημένα μέσα με μια ηλεκτρική πηγή. Στην διαφορική τους μορφή στο πεδίο του χρόνου γράφονται ως εξής:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}$$

(εξισώσεις (1.3.1) και (1.3.2), αντιστοίχως)

όπου :

\mathbf{E} είναι το διάνυσμα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου,
 \mathbf{H} είναι το διάνυσμα έντασης του μαγνητικού πεδίου,
 ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά,
 μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου και
 \mathbf{J} είναι το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι εξισώσεις (1.3.1) και (1.3.2) μπορούν να αναπτυχθούν, δημιουργώντας τις παρακάτω εξισώσεις (για το Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων):

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$

(εξισώσεις (1.3.3), (1.3.4), (1.3.5), (1.3.6), (1.3.7) και (1.3.8), αντιστοίχως)

όπου

$$\underline{E}_x, \underline{E}_y, \underline{E}_z, \underline{H}_x, \underline{H}_y, \underline{H}_z$$

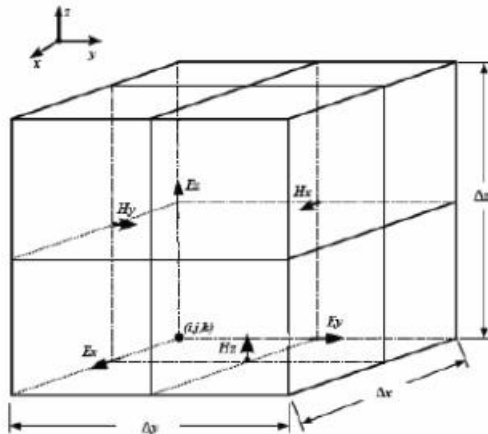
είναι οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντιστοίχως, ενώ το σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αυτές οι συνιστώσες είναι συναρτήσεις του χρόνου t και των 3 καρτεσιανών συντεταγμένων x, y και z .

Ο Yee βάσισε το σχέδιο χώρο-χρονικής κατανομής των συντεταγμένων του πεδίου στον αριθμητικό του αλγόριθμο πάνω στον νόμο του Faraday (μια χρονική μεταβολή του διανύσματος της πυκνότητας της μαγνητικής ροής δημιουργεί συνιστώσες ηλεκτρικού πεδίου γύρω από αυτόν το συντελεστή προς αυτή την μεταβολή) και στο γεγονός πως μια χρονική μεταβολή του διανύσματος της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση εμφανίζει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω της, στην κατεύθυνση της μεταβολής. Αυτές οι παρατηρήσεις αποτελούν την βάση της θεωρίας μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του μακροσκοπικού σύμπαντος. Η Εικόνα 1.3.1 δείχνει την διακριτή χωρική γεωμετρία των συντεταγμένων σε αυτό που ονομάζεται *ορθογώνιο κελί του Yee*.

Εικόνα 1.3.1. Χωρική κατανομή των συντεταγμένων του πεδίου των E και H στο κελί Yee (i,j,k).

(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Όταν διεξάγονται οι προσομοιώσεις μετάδοσης κύματος σε μια συγκεκριμένη κατασκευή, το κελί που απεικονίζεται στην Εικόνα 1.2.1 εφαρμόζεται σε όλη την περιοχή που μας ενδιαφέρει (περιοχή ανάλυσης) προκειμένου να απεικονίσει συνιστώσες των πεδίων:

$$\vec{E} \text{ and } \vec{H}$$

Κάθε σημείο στο πλέγμα καθορίζεται από τους διακριτούς δείκτες i , j , και k . Αυτό σημαίνει πως μια συγκεκριμένη θέση x , y , z (σε μέτρα) απεικονίζεται στον διακριτό χώρο από τα i , j και k (αριθμός αντίστοιχου κελιού) με τέτοιο τρόπο που $x=i\cdot\Delta x$, $y=j\cdot\Delta y$, $z=k\cdot\Delta z$, όπου Δx , Δy και Δz είναι οι διαστάσεις του κελιού Y_{ee} .

1.3.1 Οι εξισώσεις FDTD για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο

Βασισμένοι στις θεωρήσεις της μεθόδου FDTD που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως οι παράγωγοι που εμφανίζονται στις εξισώσεις (1.3.3), (1.3.4), (1.3.5), (1.3.6), (1.3.7) και (1.3.8) μπορούν να προσεγγιστούν από παράγωγους που εστιάζουν στον χρόνο και στον χώρο (κεντρικές διαφορές). Η παρακάτω εξίσωση (1.3.1.1) προέκυψε από την αποκοπή της τρίτης τάξης της σειράς Taylor, προσδιορίζοντας την έννοια της μονοδιάστατης κεντρικής παραγωγού.

$$\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=x_a} \approx \frac{f(x_a + \Delta x) - f(x_a - \Delta x)}{2 \cdot \Delta x}$$

Η παράγωγος στο σημείο x_a της συνάρτησης $f(x)$ αναφορικά με το x προσδιορίζεται ως συνάρτηση των θέσεων $x+\Delta x$ και $x-\Delta x$. Θεωρητικά, όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του Δx τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της παραγωγού. Υπολογιστικά, αυτή η τιμή περιορίζεται από την ακρίβεια της υπολογιστικής μηχανής που χρησιμοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο, μια συνάρτηση F που εξαρτάται από τις χωρικές συντεταγμένες (x,y,z) και το χρόνο t προσεγγίζεται από την παρακάτω συνάρτηση (1.3.1.2)

$$F_d^n$$

ή

$$F(t, x, y, z) \approx F_d^n(i, j, k)$$

όπου i, j, k είναι οι δείκτες των χωρικών αυξήσεων και n είναι η χρονική αύξηση.

Εφαρμόζοντας την έννοια των κεντρικών παραγώγων στις εξισώσεις (1.3.3), (1.3.4), (1.3.5), (1.3.6), (1.3.7) και (1.3.8), οι τροποποιημένες εξισώσεις FDTD για την συνιστώσα x του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου λαμβάνουν, αντιστοίχως, την μορφή των παρακάτω εξισώσεων (1.3.1.3) και (1.3.1.4):

$$\begin{aligned}
 E_x^{n+1} &= E_x^n \left(\frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}} \right) + \\
 &+ \frac{\Delta t}{\epsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, \frac{1}{2}k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, \frac{1}{2}j, \frac{1}{2}k)}{\Delta y} \right] \\
 &- \frac{\Delta t}{\epsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, \frac{1}{2}j, k + \frac{1}{2}) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, \frac{1}{2}j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \\
 H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}) &= H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}) + \\
 &+ \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_y^n(i, j, \frac{1}{2}k + 1) - E_y^n(i, j, \frac{1}{2}k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta y} \right]
 \end{aligned}$$

Σε αυτή την μελέτη, η μέθοδος συμπληρώθηκε με τη χρήση της τεχνικής λεπτών συρμάτων (Baba *et al* 2005), προκειμένου να προσομοιωθούν αγωγοί με διαμέτρους μικρότερες από τις χωρικές αυξήσεις. Επίσης εφαρμόστηκαν τα μονοαξονικά τέλεια προσαρμοσμένα στρώματα (UPML) (Taflove & Hagness 2000) για αγωγή μέσα προκειμένου να αποκοπεί ο αλγόριθμος FDTD.

1.3.2 Ακρίβεια και σταθερότητα

Οι εξισώσεις (1.3.1.3) και (1.3.1.4) ικανοποιούν όλες τις προϋποθέσεις που συζητήθηκαν προηγουμένως όσον αφορά στις κυκλικές συνθήκες των σχετικών λειτουργιών (curl operations) που σχετίζονται με τις χρονικές διακυμάνσεις της κάθε συνιστώσας. Όμως, μιλώντας πάντα αριθμητικά, είναι απαραίτητο να περιγραφεί ένα κριτήριο που εξασφαλίζει πως η επαναληπτική διαδικασία συγκλίνει προς μια ακριβή λύση. Αυτή η συνθήκη είναι στενά συνδεδεμένη με τις χωρικές αυξήσεις των Δx , Δy και Δz και την συσχέτισή τους με την χρονική αύξηση Δt .

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται από τις εξισώσεις (1.3.1.3) και (1.3.1.4) εγγενώς δεν είναι ακριβής εξαιτίας αριθμητικών επιδράσεων, όπως είναι η διασπορά (η ταχύτητα της φάσης είναι διαφορετική από εκείνη στο κενό). Αυτό συμβαίνει διότι οι προσεγγίσεις στους υπολογισμούς προκαλούν σφάλματα που μεταδίδονται, η απόκλιση της φάσης συσσωρεύεται και τελικά εμφανίζονται μη φυσικά φαινόμενα. Για να μειώσουμε τέτοια φαινόμενα, υιοθετούνται τα ακόλουθα κριτήρια (εξισώσεις (1.3.2.1) και (1.3.2.2)):

$$\Delta x, y, z \leq \frac{\lambda_{\min}}{10}$$

όπου ένα μήκος κύματος πρέπει να συμβολίζεται από τουλάχιστον δέκα κελιά, σχετιζόμενα με την παρακάτω συνθήκη:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}$$

Η συνθήκη αυτή είναι γνωστή ως συνθήκη Courant, όπου v_{\max} είναι η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης που επιτρέπεται από το μέσο που υπάρχει στην περιοχή ανάλυσης.

1.4 Μοντελοποίηση και προσομοίωση με την χρήση της μεθόδου FDTD

Όταν ένας κεραυνός πλήξει έναν πυλώνα ή τους αγωγούς προστασίας, η τάση που έχει συσσωρευτεί στο σημείο πρόσπτωσης μπορεί να οδηγήσει σε μια διαδικασία που λέγεται μαύρη σπίθα σε ανατροπή (back flashover). Το back flashover συμβαίνει όταν η αλυσίδα μονωτήρων χάσει την μονωτική της ιδιότητα και γίνεται εκκένωση προς τους αγωγούς φάσης. Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο, η αλυσίδα μονωτήρων πρέπει να είναι ικανή να αντέξει στην τάση που της εφαρμόζεται. Με άλλα λόγια η τάση κατά μήκος της αλυσίδας μονωτήρων πρέπει να είναι μικρότερη από το βασικό επίπεδο μόνωσης έναντι κεραυνών (BIL) του μονωτή. Αυτή η τάση είναι μια συνάρτηση της τάσεως στο σημείο όπου η αλυσίδα μονωτήρων συνδέεται στον πυλώνα, της στιγμιαίας τάσης σε κάθε φάση και της επαγόμενης τάσης σε κάθε φάση από την τάση των αγωγών προστασίας. Για να προσδιορίσουμε την απόδοση των γραμμών μεταφοράς εξαιτίας της πτώσης κεραυνού σε έναν πυλώνα ή στους αγωγούς προστασίας, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων και την αντίδραση του πυλώνα στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος. Τα στοιχεία για το πρώτο μπορούν να αποκτηθούν με την τοπογραφική αποτύπωση πτώσεων κεραυνών της περιοχής όπου θα κατασκευαστεί η γραμμή και για το δεύτερο μπορούν να αποκτηθούν από την προσομοίωση πλήξης κεραυνού πάνω στον πυλώνα.

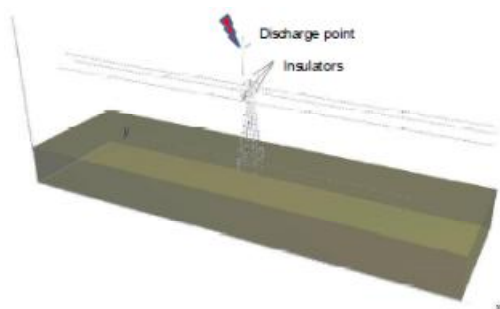
Η μέθοδος FDTD επιλέχτηκε διότι είναι επαρκής για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Maxwell, προκειμένου να αποκομιστούν ακριβείς μεταβατικές λύσεις όσον αφορά στις εκκενώσεις κεραυνών που συμβαίνουν στην περιοχή ή σε συστήματα ενέργειας. Αυτοί οι παλμοί κεραυνών μπορούν να παράγουν σημαντική ισχύ σε ζώνες γύρω από συχνότητες πολύ μεγαλύτερες των 60 Hertz, κάτι το οποίο απαιτεί λύσεις πλήρους κύματος για την αντιμετώπιση και μοντελοποίηση τέτοιου είδους προβλήματος εφόσον απαιτείται μεγάλη

ακρίβεια στις λύσεις. Εκτός από αυτό, προκειμένου να εξετάσουμε ρεαλιστικές καταστάσεις, τα συστήματα ενέργειας, τα οποία αποτελούν πολύπλοκες κατασκευές, πρέπει να μοντελοποιηθούν όπως οι αγωγοί, τα διηλεκτρικά υλικά, τα συστήματα γείωσης (και το ίδιο το έδαφος), οι γραμμές μεταφοράς και τα στοιχεία κυκλώματος, τα οποία διανέμονται στον τρισδιάστατο χώρο στην περίπτωση υπερβολικά πολύπλοκων γεωμετρικών διατάξεων, όπως συμβαίνει σε ένα ενεργειακό υποσταθμό.

1.4.1 Η μοντελοποιημένη κατασκευή

Μια γραμμή μεταφοράς 230 kV μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον LANE-SAGS (De Oliveira & Sobrinho 2009). Η Εικόνα 1.4.1.1 απεικονίζει το σενάριο προσομοίωσης για μια εκκένωση κεραυνού σε έναν πυλώνα ύψους 49μ.

Εικόνα 1.4.1.1. Μοντελοποιημένος πυλώνας σε υπολογιστικό περιβάλλον.
(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν θεωρώντας τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της περιοχής ανάλυσης :

- χρησιμοποιήθηκε ένας εικονικός ανηχοϊκός θάλαμος με διαστάσεις 250, 70 και 100 μ για τους άξονες x, y, z, αντίστοιχα.
- κάθε κελί δημιουργήθηκε με κυβικά κελιά με ακμές 0,5μ.

- ο το έδαφος μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την τιμή 50S/m για την σχετική διηλεκτρική σταθερά και την τιμή 0,002 S/m για την ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- ο μοντελοποιημένος μονωτής είχε μήκος 1,5μ και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά $\sigma=10^{-12}$ S/m και $\epsilon_r=7,5$.
- το σύστημα γείωσης του πυλώνα αποτελείται από τέσσερις αγωγούς γείωσης με μήκος 80μ ο καθένας και τοποθετημένους 0,5 μ κάτω από το έδαφος.

Η πηγή διέγερσης ορίζεται ως εξής:

- ο Για $t \leq 1,5T_f$

$$I_s(t) = \frac{\ln \alpha \beta}{A_t} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \cdot \sin^2(\omega_0 t)$$

- ο Για $t \geq 1,5T_f$

$$I_s(t) = \frac{\ln \alpha \beta}{A_0} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

όπου

$$\alpha_1 = \frac{1.93147180}{T_f}, \alpha_2 = \frac{2.558427881}{T_f}$$

$$t_0 = \frac{\ln \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)}{(\alpha_1 - \alpha_2)}, A_0 = e^{\alpha t_0} - e^{\beta t_0}, \omega_0 = \frac{\pi}{3T_f},$$

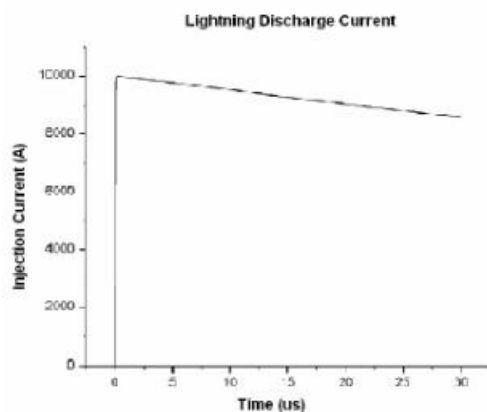
$$T_f = 0.063 \mu s, T_r = 500 \mu s, I_{max} = 1 kA$$

όπου I_{max} είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκκένωσης του κεραυνού.

Μια απεικόνιση του ρεύματος εκκένωσης στο σημείο πρόσπτωσης φαίνεται στην Εικόνα 1.4.1.2.

Εικόνα 1.4.1.2. Απεικόνιση του ρεύματος εκκένωσης στο σημείο πρόσπτωσης.

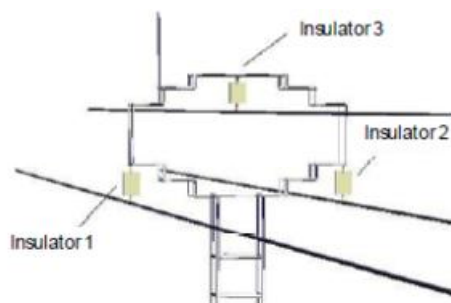
(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Η Εικόνα 1.4.1.3 δείχνει με περισσότερη λεπτομέρεια τις θέσεις των μονωτήρων στην κεφαλή του πυλώνα. Τα εξαρτήματά τους είναι φτιαγμένα από επικασσιτερωμένο ασάλι (γαλβανισμένο χάλυβα).

Εικόνα 1.4.1.3. Λεπτομέρειες μονωτήρων στην κεφαλή του πυλώνα.

(Πηγή: Leite *et al* 2010)

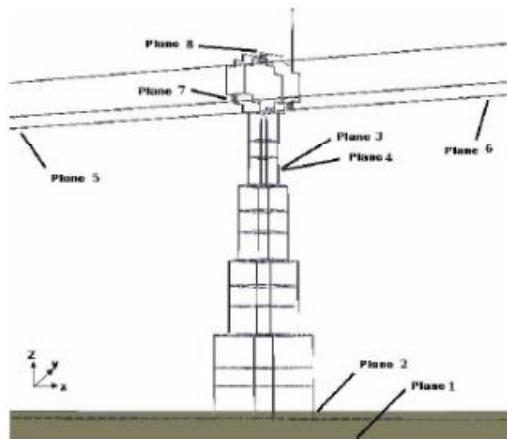


1.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι κατανομές των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων βρέθηκαν μετά την διεξαγωγή προσομοίωσης σε πολλά επίπεδα παρακολούθησης και στιγμές στον χρόνο. Η Εικόνα 1.4.2.1 δείχνει τα επίπεδα όπου αποτυπώθηκαν οι κατανομές των πεδίων.

Εικόνα 1.4.2.1. Επίπεδα αποτύπωσης κατανομής πεδίου.

(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Το επίπεδο 1 είναι μέσα στο έδαφος και κάτω από τους αγωγούς γείωσης στο επίπεδο xy .

Το επίπεδο 2 είναι ένα xy επίπεδο μέσα στο έδαφος, στο ίδιο επίπεδο με τους αγωγούς γείωσης.

Το επίπεδο 3 είναι ένα yz επίπεδο (κάθετο) που είναι τοποθετημένο στην μέση της κατασκευής του πυλώνα.

Το επίπεδο 4 είναι ένα xz επίπεδο (κάθετο) που είναι επίσης τοποθετημένο στην μέση της κατασκευής του πυλώνα.

Το επίπεδο 5 είναι ένα xy επίπεδο που περνάει πάνω από τους αγωγούς φάσης.

Το επίπεδο 6 είναι ένα yz επίπεδο, ορθογώνιο ως προς τους αγωγούς φάσης.

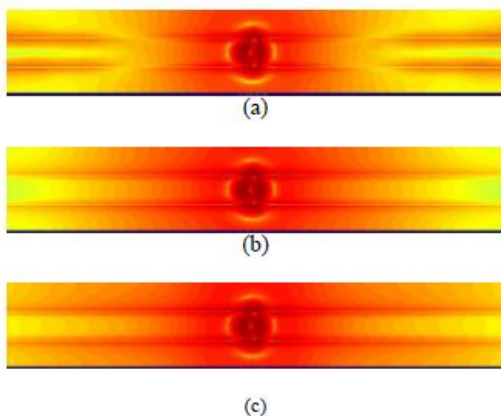
Το επίπεδο 7 είναι ένα xy επίπεδο που τέμνει τους κάτω μονωτήρες του πυλώνα.

Το επίπεδο 8 είναι ένα xy επίπεδο που διασχίζει κατά μήκος τον άνω μονωτήρα.

Η Εικόνα 1.4.2.2 δείχνει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο 7 στις χρονικές στιγμές 1 μs ,10 μs και 20 μs . Σε αυτή, οι τρεις μικροί κύκλοι στο κέντρο της εικόνας είναι οι μονωτήρες, οι οποίοι είναι φανερό πως υποβάλλονται σε υψηλές τιμές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Εικόνα 1.4.2.2. Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο 7 στις χρονικές στιγμές 1 μs (a),10 μs (b) και 20 μs (c).

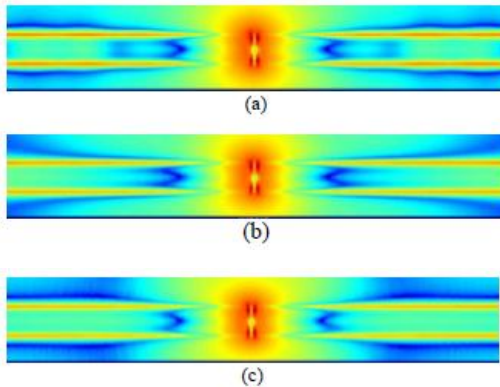
(Πηγή: Leite *et al*/2010)



Η Εικόνα 1.4.2.3 δείχνει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο 7 στις χρονικές στιγμές 1 μs , 10 μs και 20 μs .

Εικόνα 1.4.2.3. Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο 7 στις χρονικές στιγμές 1 μs (a), 10 μs (b) και 20 μs (c).

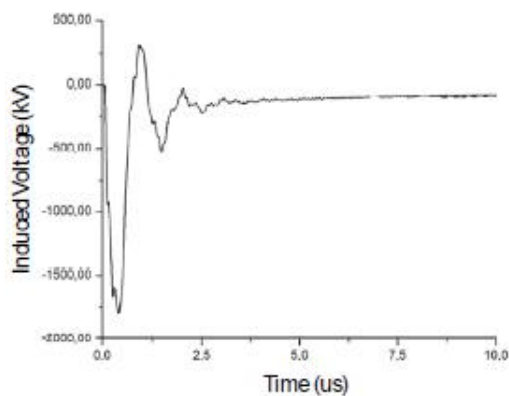
(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Η Εικόνα 1.4.2.4 δείχνει την επαγόμενη τάση στον μονωτήρα 1. Φαίνεται πως η ακρότατη τάση είναι σχεδόν -1750 kV και αυτό το ελάχιστο συμβαίνει στην χρονική στιγμή πριν τα 0,5 μs .

Εικόνα 1.4.2.4. Επαγόμενη τάση στον μονωτήρα εξαιτίας πτώσης κεραυνού πάνω στον πυλώνα.

(Πηγή: Leite *et al* 2010)



Μπορεί να παρατηρηθεί επίσης πως υπάρχουν και άλλα δύο ακρότατα, ένα μέγιστο σχεδόν 300 kV στα 2μs και ένα άλλο ελάχιστο -500 kV περίπου στα 2,5μs. Η αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από 10 μονωτές με διάμετρο 255mm. Το BIL για αυτή την χορδή στην αρνητική πολικότητα είναι 835 kV, όπως μπορεί να το δει κανείς από την Εικόνα 1.4.2.4 όπου το πρώτο ακρότατο είναι περίπου 1750 kV στην αρνητική πολικότητα. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το BIL (σε απόλυτη τιμή), οπότε οι μονωτήρες δεν θα αντέξουν την τάση που θα τους ασκηθεί εξαιτίας της πτώσης του κεραυνού. Ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμο να υιοθετηθούν κάποια αντίμετρα, όπως η εγκατάσταση δαχτυλιδιών κορώνα, η βελτίωση του συστήματος γείωσης, κ.λπ., τα οποία πρέπει να ενσωματωθούν και στο λογισμικό που χρησιμοποιείται για αυτή την ανάλυση.

1.4.3 Συμπεράσματα

Η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον για ανάλυση και σύνθεση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορεί να φανεί ότι αυτό το περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης των γραμμών μεταφοράς σε περιπτώσεις ατμοσφαιρικών εκκενώσεων. Η πολυπλοκότητα του σεναρίου προσομοίωσης αυξάνει ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης, ενώ διάφορες κατασκευές, όπως κτίρια, γραμμές διανομής, δέντρα, κ.λπ. μπορούν να προστεθούν στο σενάριο προσομοίωσης. Το φιλικό περιβάλλον που υπεισέρχεται βοηθά τους μηχανικούς που δεν έχουν βαθιά γνώση της φυσικής και των μαθηματικών που υπεισέρχονται να χειριστούν τις προσομοιώσεις με έναν πολύ εύκολο τρόπο. Εξάλλου, πολλές περιπτώσεις μπορούν να αξιολογηθούν γρήγορα πριν από τις δοκιμές υψηλής τάσης στα εργαστήρια, όπου τελικά καταλήγουν για δοκιμή μόνο οι πλέον αντιπροσωπευτικές και ενδεδειγμένες περιπτώσεις, οπότε με τον τρόπο αυτόν εξοικονομείται χρόνος και χρήμα.

1.5 Προσομοίωση μεταβατικών τάσεων των εφεδρικών δικτύων ενέργειας μιας μεγάλης εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της άμεσης πρόσπτωσης κεραυνού στην εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης

Οι μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θέτονται σε κίνδυνο από πλήγματα κεραυνών με πιθανές συνέπειες όσον αφορά στην ασφάλεια και την διαθεσιμότητά τους. Ένα ιδιαίτερο σενάριο αποτελεί η πρόσπτωση κεραυνού σε μια εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης, που είναι πολύ κοντά στην σύνδεση της εγκατάστασης με το δίκτυο. Εάν λοιπόν υποθέσουμε την πιθανότητα αποτυχίας ως προς την προστασία του καλωδίου από τον αγωγό γείωσης που βρίσκεται στην κορυφή της γραμμής μεταφοράς, για παράδειγμα εάν ο κεραυνός χτυπήσει άμεσα τον αγωγό φάσης, θα προκύψει μια ακραία ηλεκτρομαγνητική διαταραχή.

Πράγματι, τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε αυξημένος αριθμός αναφορών σφάλματος σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης από περιστατικά κεραυνού. Αυτά τα περιστατικά φυσικά δεν είναι καινούργια και προφανώς υπήρχαν και στο παρελθόν. Όμως, εξαιτίας της ολοένα και αυξανόμενης ευαισθησίας της κοινωνίας όπως και της αυξανόμενης αστάθειας του ηλεκτρικού δικτύου, αυτά τα περιστατικά καθίστανται πλέον πολύ σημαντικά για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού.

Μια συγκεκριμένη μορφή σφάλματος σε μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην βόρεια Ευρώπη ήταν η τελική αφορμή για την διερεύνηση ενός τέτοιου περιστατικού. Αναλυτικότερα, θεωρούμε πως ο κεραυνός πέφτει κοντά στην εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πλήττοντας άμεσα την εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης που συνδέει την εγκατάσταση με το δίκτυο μεταφοράς. Επίσης θεωρούμε ότι ο κεραυνός πλήττει άμεσα τον αγωγό φάσης και όχι τον εναέριο αγωγό γείωσης που

βρίσκεται στην κορυφή της εναέριας γραμμής μεταφοράς, οπότε εκδηλώνεται ένα επικίνδυνο σφάλμα προστασίας. Κατόπιν τούτων, οι κρουστικές τάσεις και ρεύματα που εμφανίζονται στην εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης μετασχηματίζονται στα διάφορα επίπεδα τάσης του εφεδρικού ηλεκτρικού δικτύου της εγκατάστασης, οπότε τίθενται σε κίνδυνο τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά εξαρτήματα τα οποία είναι σημαντικά για την ασφάλεια της εγκατάστασης. Αυτοί οι μετασχηματισμοί διερευνώνται με βάση λεπτομερείς αριθμητικές προσομοιώσεις. Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα ενότητα θα πραγματευτούμε την αριθμητική προσομοίωση της πρόσπτωσης κεραυνού σε μια εγκατάσταση παραγωγής και τις συνέπειες αυτής πάνω στις συνιστώσες του εφεδρικού δικτύου ρεύματος της εγκατάστασης που συνδέεται με διαφορετικά επίπεδα τάσης.

1.5.1 Προσδιορισμός της πηγής της βλάβης

Τα υφιστάμενα επίπεδα τάσεως των εξαρτημάτων που μπορούν να αντέξουν τους κεραυνούς δεν δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως πηγές βλάβης για την διερεύνηση που διεξάγουμε. Αντιθέτως, για αυτά τα εξαρτήματα μπορούν να γίνουν πειραματικές δοκιμές με την αποδοχή συγκεκριμένων προϋποθέσεων (IEC 60071-1:2006-01). Ως εκ τούτου, για τις αριθμητικές προσομοιώσεις των μηχανισμών σύζευξης μέσω διακριτών στοιχείων (π.χ. μετασχηματιστές) είναι απαραίτητος ένας άλλος προσδιορισμός της πηγής της βλάβης.

Αυτό ο προσδιορισμός βρίσκεται στην προτυποποίηση προστασίας από κεραυνούς. Την στιγμή του πλήγματος τροφοδοτείται άμεσα το ρεύμα από τον κεραυνό και το γεγονός αυτό εμφανίζει ως πηγή της βλάβης την πηγή του ρεύματος. Οι ορισμοί που υπεισέρχονται δίνονται στα πρότυπα IEC 62305-1:2006 και IEC 81/335/CDV(IEC 62305-1 Edition 2):2009.

Στην περίπτωση που εξετάζουμε, επιλέγουμε το επίπεδο προστασίας από κεραυνό I (Lighting Protection Level I - LPL I), όπου στην προσομοίωση πρέπει να συμπεριληφθούν οι παρακάτω τρεις συνιστώσες ρεύματος κεραυνού:

Πρώτο θετικό πλήγμα:

Εύρος ρεύματος κεραυνού: 200 kA

Κλίση Μετώπου: 20 kA/μs

Χρόνος Μετώπου: 10 μs

Χρόνος ημίσεως εύρους: 350 μs

Πρώτο αρνητικό πλήγμα:

Εύρος ρεύματος κεραυνού: 100 kA

Κλίση Μετώπου: 100 kA/μs

Χρόνος Μετώπου: 1 μs

Χρόνος ημίσεως εύρους: 200 μs

Επακόλουθο αρνητικό πλήγμα:

Εύρος ρεύματος κεραυνού: 50 kA

Κλίση Μετώπου: 200 kA/μs

Χρόνος Μετώπου: 0,25 μs

Χρόνος ημίσεως εύρους: 100 μs

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, υποτίθεται πως για την υπό διερεύνηση εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης υπάρχει μια αποκαλούμενη αποτυχία προστασίας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60099-5, σύμφωνα με την οποία τα μέτρα προστασίας της γραμμής (π.χ. ο εναέριος αγωγός γείωσης, κ.λπ.) αποτυγχάνουν. Αυτό οδηγεί κατά συνέπεια σε ένα άμεσο πλήγμα του αγωγού φάσης της εναέριας γραμμής μεταφοράς.

1.5.2 Προσδιορισμός μιας τυπικής διάταξης μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η τυπική διάταξη της εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνει όλα τα τυπικά εξαρτήματα, φορτία και μέτρα προστασίας στα διαφορετικά επίπεδα τάσης του εφεδρικού δικτύου μεταφοράς.

- Οι γραμμές σύνδεσης (υψηλής και χαμηλής τάσης) ποικίλλουν και έχουν διαφορετικά μήκη και τμήματα διασταύρωσης.
- Γίνεται εγκατάσταση ενός αναστολέα υπερτάσεων στην πλευρά του υποσταθμού υψηλής τάσης 400kV για να προστατεύσει την εγκατάσταση από τα πλήγματα κεραυνού από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Πολύ κοντά σε αυτόν βρίσκεται ο μετασχηματιστής 420kV/27kV, ισχύος 1070 MVA.
- Στο δευτερεύον αυτού του μετασχηματιστή (τα 27kV αντιπροσωπεύουν την τάση της γεννήτριας παραγωγής του ρεύματος) υπάρχει ένας άλλος αναστολέας και ένας πυκνωτής υψηλής τάσης (10.....100nF), ο οποίος χρησιμεύει για την προστασία από τις υψίσυχνες διαταραχές που δημιουργούνται από την γεννήτρια.
- Ένας βοηθητικός μετασχηματιστής 27kV/10kV υποβιβάζει την τάση στο υψηλότερο εσωτερικό επίπεδο, για τις πιο ενεργοβόρες βοηθητικές συσκευές, π.χ. αντλίες. Σε μια τυπική διάταξη, αυτά τα φορτία γενικά προσομοιώνονται με δυο διαφορετικούς κινητήρες : 250kW και 2450kW.
- Η πλειοψηφία των βοηθητικών εξαρτημάτων (μικρότεροι κινητήρες, θερμαντήρες, εξαερισμοί, συστήματα I&C) συνδέονται με ένα επίπεδο τάσης 0,4kV. Αυτό το επίπεδο τροφοδοτείται από τον βοηθητικό μετασχηματιστή ενέργειας 10kV/0,4kV. Για την προσομοίωση των φορτίων χρησιμοποιούνται απλές ωμικές αντιστάσεις.

1.5.3 Υψίσουχνα μοντέλα για τα στοιχεία του εφεδρικού ηλεκτρικού δικτύου

Η επιλογή και ο προσδιορισμός των παραμέτρων των μοντέλων για το εφεδρικό δίκτυο ενέργειας έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους υπολογισμούς. Για μερικά εξαρτήματα υπάρχουν ικανοποιητικά μοντέλα (π.χ. σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στα CIGRE Study Committee 33, IEC 28/156/DTR, IEC 60071-2:1996-12). Ωστόσο, για άλλα εξαρτήματα αυτά τα μοντέλα και οι παράμετροί τους δεν είναι διαθέσιμα, ούτε από πρότυπα ούτε από τους κατασκευαστές, οπότε πρέπει να υπολογιστούν.

Τα μοντέλα πρέπει να είναι έγκυρα όσον αφορά στο συχνοτικό εύρος των κεραυνών, το οποίο στην περίπτωση που εξετάζουμε θεωρούμε ότι κυμαίνεται μεταξύ 10 Hz έως 10 MHz. Όμως, το κύριο κομμάτι της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης συγκεντρώνεται ανάμεσα στα 10kHz και στο 1 MHz.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το πλήγμα του κεραυνού λαμβάνει χώρα στον αγωγό φάσης, έπεται ότι επαρκεί ένα ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα. Συνεπώς, απαιτούνται μόνο μοντέλα μονοφασικά. Έπειτα, υπολογίζουμε την διαμήκη τάση (κοινή μέθοδος) που προκαλείται από το πλήγμα του κεραυνού δηλαδή την τάση ανάμεσα στον ενεργό αγωγό και το σύστημα εδάφους ή το ισοδύναμο σύστημα, αντιστοίχως. Έτσι, η μοντελοποίηση μεγάλων γεωμετρικών κατασκευών, όπως είναι τα τμήματα της εναέριας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης, κ.λπ., πρέπει να εξετάσει το φαινόμενο των παλινδρομικών κυμάτων, εάν το μήκος τους ξεπερνά την μέγιστη τιμή S_{max} (CIGRE Study Committee 33):

$$S_{max} = \frac{v}{5 \cdot f_{max}} \quad (\text{εξίσωση 1.5.3.1})$$

όπου

v : η ταχύτητα διάδοσης (στην περίπτωση των εναέριων γραμμών μεταφοράς προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός $v=300\text{m}/\mu\text{s}$),

f_{\max} : η υψηλότερη αναμενόμενη συχνότητα

Εάν το f_{\max} τεθεί συντηρητικά στα 3 MHz, όλα τα στοιχεία που είναι μεγαλύτερα των 20μ θα πρέπει να μοντελοποιηθούν ως γραμμές οδεύοντος κύματος ή ως ένα κύκλωμα με παραπάνω από ένα τμήμα π.

1.5.3.1 Η εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης

Η μοντελοποίηση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιλαμβάνει μόνο μια φάση. Με βάση τα γεωμετρικά δεδομένα, οι εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μοντελοποιούνται γενικά ως γραμμές με απώλειες (IEC 28/156/DTR). Όμως, η παράλληλη αντίσταση μπορεί να αγνοηθεί, διότι τα διηλεκτρικά στοιχεία του αέρα μπορούν να θεωρηθούν χωρίς απώλειες. ($G=0$). Επίσης, για συχνότητες μεγαλύτερες του 1kHz η σειριακή αντίσταση μπορεί επίσης να παραληφθεί, διότι το επαγωγικό κομμάτι της εν σειρά αντίστασης αδιαμφισβήτητα κυριαρχεί ($R=0$).

Η χαρακτηριστική αντίσταση Z_L του αγωγού φάσης ή της δέσμης αγωγών ισούται με (IEC 60071-2:1996-12):

$$Z_L = 60 \cdot \Omega \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_E}\right)$$

$$r_E = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot (r_b)^{n-1}}$$

(εξίσωση 1.5.3.1.1 και 1.5.3.1.2, αντιστοίχως)

όπου:

h : το ύψος του αγωγού φάσης (δέσμης) πάνω από το έδαφος,

r_b : η ακτίνα της δέσμης,

r : η ακτίνα του αγωγού,

n : ο αριθμός των αγωγών στην δέσμη (στην περίπτωση του ενός αγωγού $n=1$ και $r_E=r$).

Ο χρόνος διάδοσης των οδευόντων κυμάτων μπορεί να υπολογιστεί από το μήκος του αγωγού και την ταχύτητα διάδοσης που δίνεται παραπάνω, ενώ η επιφάνεια του εδάφους θεωρείται δανικό αγώγιμο επίπεδο (Metwally & Heidler 2004).

1.5.3.2 Πυλώνες και μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης

Οι πυλώνες των εναέριων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης μοντελοποιούνται ως γραμμές όδευσης κυμάτων που έχουν σχήμα κώνου. Η χαρακτηριστική τους αντίσταση ισούται με:

$$Z_M = 60 \cdot \Omega \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot h}{r} \right)$$

όπου:

h : το ύψος στήριξης του αγωγού στον πυλώνα,

r : η ακτίνα της βάσης του πυλώνα.

Για τους τυπικούς πυλώνες των εναέριων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης η χαρακτηριστική αντίσταση είναι 150.....250Ω. Ο χρόνος διάδοσης του οδευόντος κύματος για τον πυλώνα προκύπτει από το ύψος του βραχίονα του

ιστού που είναι πάνω από το επίπεδο του εδάφους και από την ταχύτητα διάδοσης που δίνεται παραπάνω.

Οι μονωτήρες των εναέριων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης γενικά θεωρούνται πως είναι ιδανικοί. Είναι απαραίτητο ένα ισοδύναμο κύκλωμα μοντελοποίησης μόνο σε περίπτωση αστοχίας εξαιτίας μιας τάσης κεραυνού, οπότε επιτυγχάνεται η τάση διάσπασης.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60071-2 Annex G, η τάση της διάσπασης των μονωτήρων μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης για μια τάση κεραυνού με χρόνο μετώπου 1,2μs μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\frac{U_{d/50}}{kV} = 700 \cdot \frac{d}{m}$$

όπου:

d: το μήκος του μονωτήρα (η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια).

Για κρουστικές τάσεις με ακόμα μεγαλύτερη κλίση, η τάση διάσπασης αυξάνεται. Οι υπολογισμοί δείχνουν πως, τουλάχιστον στην περίπτωση των επακόλουθων αρνητικών πληγμάτων, τα μέτωπα των τάσεων κατά μήκος των μονωτήρων είναι μικρότερα συγκριτικά με την προτυποποιημένη τάση του αναστολέα 1,2/50μs. Ως εκ τούτου, εξαιτίας της χρονικής καθυστέρησης της διάσπασης στο μονωτή, προκύπτουν υψηλότερα επίπεδα τάσεων του κεραυνού στις καθοδικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Αν επιτευχθεί ο ρυθμός διάσπασης, δηλαδή αν οι συνθήκες για την διάσπαση ακολουθούν το πρότυπο IEC 60071-4, ο μονωτήρας της εναέριας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας ιδανικός

διακόπτης για την απειλή από την τάση του κεραυνού. Αυτός ο ιδανικός διακόπτης κλείνει μέσα σε ένα χρονικό βήμα.

Η επακόλουθη αύξηση του ρεύματος περιορίζεται από την επαγωγή του ηλεκτρικού τόξου. Συνεπώς, μια επαγωγή της τάξεως του 1μH/m συνδέεται σε σειρά με τον ιδανικό διακόπτη.

1.5.3.3 Συστήματα γείωσης και αντιστάσεις γείωσης

Τα συστήματα γείωσης στους εξωτερικούς χώρους μια μεγάλης εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να θεωρηθούν ως ιδανικά, δηλαδή οι συνδέσεις των ηλεκτρικών στοιχείων στο έδαφος είναι χαμηλής αντιστάσεως. Αυτό ισχύει και για τα στοιχεία ενός εξωτερικού υποσταθμού υψηλής τάσης και τελικά για αυτές τις συνδέσεις υποθέτουμε πάντα μια τιμή $R_{E/S} = 1\Omega$.

Οι ιστοί των εναέριων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που είναι έξω από την περιοχή της εγκατάστασης παραγωγής ρεύματος γειώνονται μέσω μιας απλής ωμικής αντίστασης (IEC 28/156/DTR), ενώ πάντα θεωρείται μια τιμή $R_{E/M}=10\Omega$.

Το ισοδύναμο σύστημα εντός των δομών της εγκατάστασης παραγωγής μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί ως ιδανικό, γιατί οι ενισχύσεις των τειχών και των οροφών είναι ενσωματωμένες. Συνεπώς, αν τα ηλεκτρικά εξαρτήματα συνδέονται με το ισοδύναμο σύστημα, υπάρχει μόνο η επαγωγή των συνδέσμων (συνήθως χάλκινοι αγωγοί με διατομή 70mm²), η οποία θεωρείται 1μH/m.

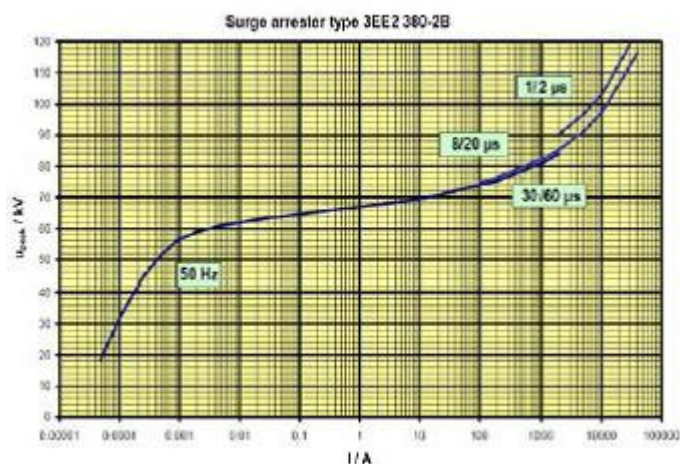
1.5.3.4 Αναστολείς υπέρτασης

Οι αναστολείς υπέρτασης που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο της υψηλής τάσης είναι βαρίστορ (αντίσταση μεταβλητής τιμής) μετάλλου-οξειδίου. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται σε σύγχρονους αναστολείς χωρίς κενό. Επίσης θεωρούμε ότι ο μετασχηματιστής που πρέπει να προστατευθεί βρίσκεται εντός των ορίων της (περιορισμένης) προστατευτικής απόστασης του αναστολέα υπέρτασης. Όμως, αυτοί οι μηχανισμοί προστασίας δεν έχουν διαστασιοποιηθεί για το σενάριο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 1.5.1: ένα άμεσο πλήγμα σε αγωγό φάσης σε κοντινή απόσταση από τον αναστολέα υπέρτασης. Συνεπώς, για τις προσομοιώσεις πρέπει να εξεταστούν τρεις σημαντικές επιδράσεις:

- Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης:

Για τα βαρίστορ που χρησιμοποιούνται, η χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως-ρεύματος είναι γνωστή (Εικόνα 1.5.3.4.1).

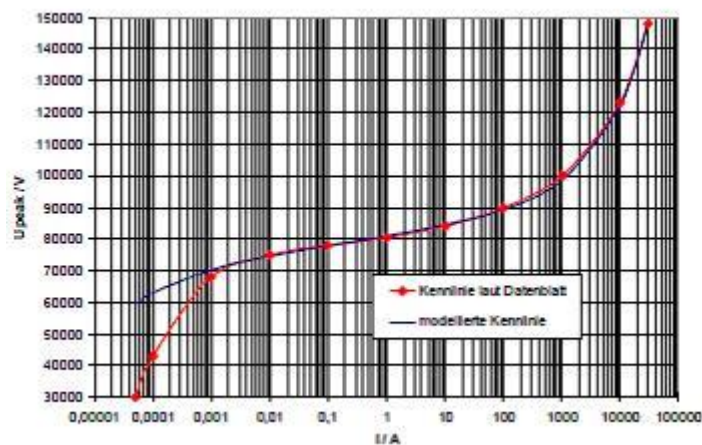
Εικόνα 1.5.3.4.1. Χαρακτηριστική καμπύλη ενός αναστολέα υπέρτασης 27kV. (Πηγή: Kern *et al* 2010)



Η βασική συμπεριφορά εξαρτάται κυρίως από την περιοχή του δίσκου. Εάν η τάση του βαρίστορ είναι γνωστή για μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος (π.χ. 10kA), τότε, για μια γνωστή περιοχή δίσκου, μπορεί να δοθεί ολόκληρη η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσεως-ρεύματος. Έτσι τα βαρίστορ προσομοιώνονται ως πηγές τάσης που ελέγχονται από το ρεύμα με μια συνεχόμενη χαρακτηριστική καμπύλη (Εικόνα 1.5.3.4.2).

Εικόνα 1.5.3.4.2. Χαρακτηριστική καμπύλη ενός αναστολέα υπέρτασης 27kV - σύγκριση δεδομένων με το μοντέλο.

(Πηγή: Kern *et al* 2010)



- Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και η αστοχία λειτουργίας του βαρίστορ:

Για τους υπολογισμούς υποθέτουμε πως, για ένα χρονικό διάστημα μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου, η διέγερση του ρεύματος είναι 5 φορές μεγαλύτερη, γεγονός που οδηγεί στην καταστροφή του αναστολέα υπέρτασης και τελικά σε ένα ηλεκτρικό τόξο στο σημείο της εγκατάστασης (Hinrichsen 2001).

- ο Η εξωτερική διάσπαση στο περίβλημα του αναστολέα:

Λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη που είναι παρόμοια με αυτήν στον μονωτήρα (βλ. ενότητα 1.5.3.2).

Οι προσομοιώσεις με διαφορετικές συνθήκες εγκατάστασης και με τις τρεις συνιστώσες ρεύματος κεραυνού (ενότητα 1.5.1) δείχνουν διαφορετικές αντιδράσεις του αναστολέα υπέρτασης:

- ü Όταν ο αναστολέας δεν υπερφορτώνεται ενεργειακά και οι συνθήκες για την εξωτερική διάσπαση δεν δίνονται, τότε η υπολειπόμενη τάση του αναστολέα δίνεται από την χαρακτηριστική καμπύλη του βαρίστορ.
- ü Όταν ο αναστολέας υπερφορτώνεται ενεργειακά αλλά οι συνθήκες για την εξωτερική διάσπαση δεν δίνονται, τότε η υπολειπόμενη τάση του αναστολέα δίνεται από την τάση του ηλεκτρικού τόξου, αφού ο αναστολέας έχει αποτύχει.
- ü Όταν δίνονται οι συνθήκες για την εξωτερική διάσπαση του αναστολέα, λίγο πριν υπερφορτωθεί ενεργειακά, τότε η υπολειπόμενη τάση του απαγωγέα δίνεται από την τάση του ηλεκτρικού τόξου, αφού έχει συμβεί η εξωτερική διάσπαση.

Οι προαναφερθείσες αντιδράσεις του αναστολέα οδηγούν σε διαφορετικές τάσεις κεραυνών στις καθοδικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Για την διερεύνηση της μέγιστης καταπόνησης της μόνωσης εκεί, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στην δυσμενέστερη περίπτωση.

1.5.3.5 Μετασχηματιστές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τους μετασχηματιστές, ακόμα και αν υπάρχουν προτεινόμενα μοντέλα βάσει προτύπων (CIGRE Study Committee 33, IEC 28/156/DTR), εντούτοις οι παράμετροι για αυτά τα μοντέλα συνήθως δεν είναι διαθέσιμες. Συνεπώς, για κάποιους τυπικούς μετασχηματιστές που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εν λόγω εργασίας, οι συναρτήσεις μεταφοράς μετρήθηκαν πειραματικά. Υπενθυμίζεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς βασίζεται στην θεωρία του ηλεκτρικού τετραπόλου και υπολογίζεται μέσω της ανάλυσης της απόκρισης συχνότητας, όπου σημαντικές παράμετροι είναι η χωρητικότητα της κύριας περιέλιξης στην γη, η χωρητικότητα της δευτερεύουσας περιέλιξης στην γη, η χωρητικότητα της κύριας περιέλιξης με την δευτερεύουσα περιέλιξη και οι αυτεπαγωγές των πρωτεύοντων και δευτερευόντων αγωγών περιέλιξης.

Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν μια ημιτονοειδή είσοδο σε ένα μεγάλο εύρος συχνότητας, καθώς και μια κρουστική είσοδο, στο πρωτεύον και οι δύο, ενώ η έξοδος μετρήθηκε στο δευτερεύον των μετασχηματιστών.

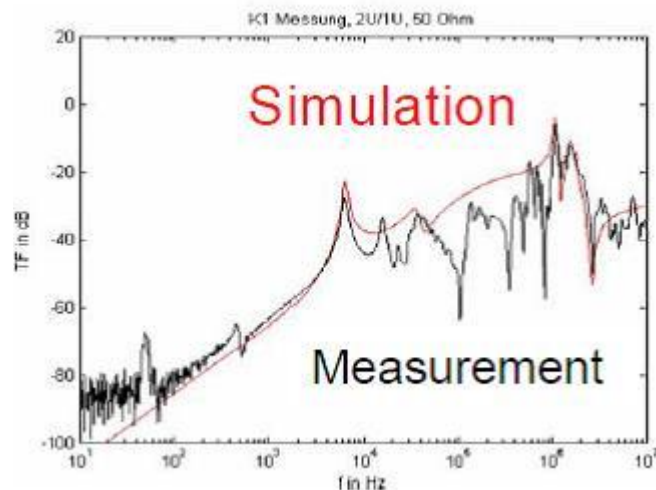
Για την ημιτονοειδή είσοδο, το εύρος συχνότητας προσδιορίστηκε με περίπου 2000 υποστηρικτικά σημεία, κατανεμημένα λογαριθμικά. Η γεννήτρια εισόδου ήταν μια πηγή τάσης με 10 Vpp και μεταβλητή συχνότητα. Λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά χαμηλό επίπεδο τάσης, είναι αναμενόμενες μικρές διακυμάνσεις στο χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων, οι οποίες παρόλα αυτά μπορούν να αγνοηθούν. Ο λόγος για αυτό είναι η μη γραμμικότητα και η εξάρτηση από την τάση του σιδερένιου μαγνητικού πυρήνα, έως περίπου τα 10 kHz. Πάνω από αυτό το όριο συχνότητας, ο σιδερένιος μαγνητικός πυρήνας είναι σχεδόν απαλλαγμένος από πεδία και συνεπώς δεν υφίσταται καμία επιρροή.

Η κρουστική είσοδος των 400 V χρησιμοποιήθηκε για να εξακριβωθούν τα αποτελέσματα στα πεδία συχνότητας και χρόνου με μια δεύτερη ευρυζωνική μέτρηση.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, σε μια πρώτη προσέγγιση, χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα της CIGRE Study Committee 33 και του Draft Technical Report of IE CTC 28 για να γίνει περιγραφή της σύζευξης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Όμως, αυτά τα πρότυπα κρίθηκαν τελικά ως μη αρκετά ακριβή και άρα ανεπαρκή για την υπό μελέτη εργασία (Εικόνα 1.5.3.5.1) κι έτσι σε μια ολόκληρη προσομοίωση προέκυψαν αποκλίσεις σε ποσοστό άνω του 50% στο τελικό αποτέλεσμα.

Εικόνα 1.5.3.5.1. Το φάσμα της τάσης για έναν τυπικό μετασχηματιστή (BBC GM 100 990) σύμφωνα με τα πρότυπα της CIGRE Study Committee 33 και του Draft Technical Report of IE CTC 28.

(Πηγή: Kern *et al* 2010)

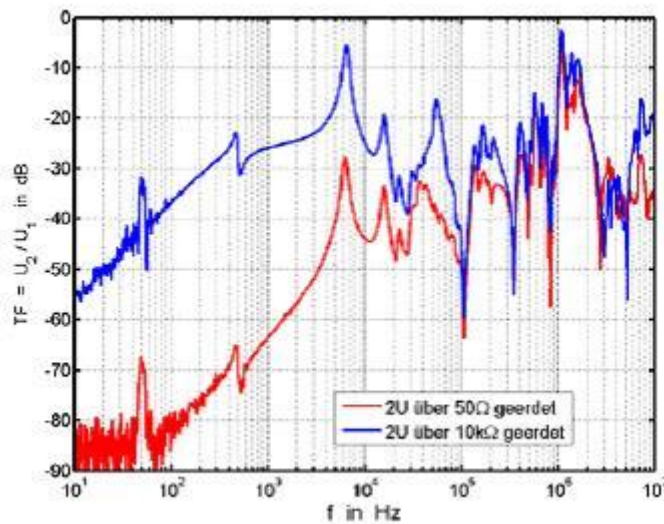


Περαιτέρω, τα εξαρτήματα προσομοιώθηκαν διαμέσου ενός δικτυωτού συμπλέγματος, όπου διαπιστώθηκε μια καλή συσχέτιση του φάσματος και της

μετατόπισης φάσης ανάμεσα στα αποτελέσματα μέτρησης (Εικόνα 1.5.3.5.2) και προσομοίωσης (Εικόνα 1.5.3.5.3). Ως εκ τούτου, όλα τα μοντέλα για την περιγραφή της σύνθετης αντίστασης και της απόσβεσης των μετασχηματιστών αναπτύχθηκαν κάνοντας χρήση της εν λόγω μεθόδου.

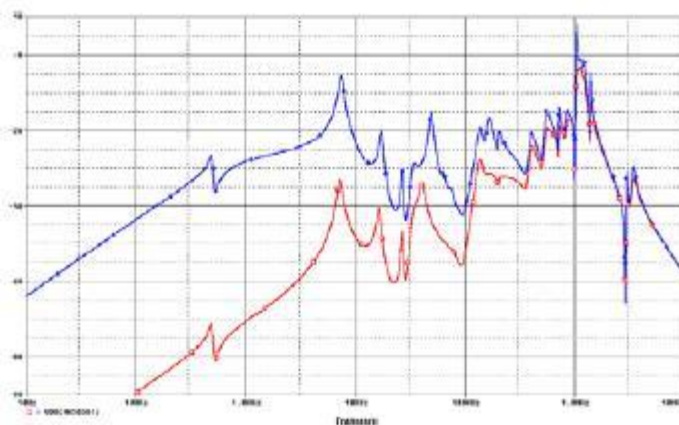
Εικόνα 1.5.3.5.2. Το φάσμα του εύρους για έναν τυπικό μετασχηματιστή (BBC GM 100 990) – Μέτρηση.

(Πηγή: Kern *et al* 2010)



Εικόνα 1.5.3.5.3. Το φάσμα του εύρους για έναν τυπικό μετασχηματιστή (BBC GM 100 990) – Προσομοίωση με ένα δικτυωτό σύμπλεγμα.

(Πηγή: Kern *et al* 2010)



1.5.3.6 Αγωγοί

Με βάση τα δεδομένα για την γεωμετρία και τα διηλεκτρικά υλικά, οι αγωγοί επίσης προσομοιώνονται ως γραμμές με απώλειες γενικά, παρόμοια με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Βεβαίως, στο εύρος συχνότητας που μας ενδιαφέρει, η παράλληλη αντίσταση μπορεί ξανά να αγνοηθεί ($G=0$).

Στην περίπτωση των θωρακισμένων αγωγών μέσης τάσης, οι αγωγοί φάσης μπορεί να έχουν ξεχωριστή θωράκιση, οπότε πρέπει να μελετηθούν ως δύο ισοδύναμα κυκλώματα. Από την μία, το εσωτερικό κύκλωμα αποτελείται από τον μονοφασικό αγωγό και την επιφάνεια της εσωτερικής προστασίας. Από την άλλη, το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από την επιφάνεια της εξωτερικής προστασίας και το περιβάλλον ισοδύναμο σύστημα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να προσομοιωθεί ο αγωγός μέσης τάσης ως δυο συζευγμένες γραμμές οδεύοντος κύματος που έχουν διαφορετικές σύνθετες αντιστάσεις. Για την περίπτωση αυτή υπάρχουν επαρκείς εξισώσεις για την επαγωγή και την χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους τόσο του εσωτερικού κυκλώματος (κυκλικός αγωγός σε έναν ομόκεντρο κύλινδρο) όσο και του εξωτερικού (Hilberg 1981, Lindenmeier 2008).

1.5.3.7 Γεννήτριες και κινητήρες

Η προσέγγιση για την κύρια γεννήτρια στην εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, όπως και για τα προερχόμενα από τον 10 kV κινητήρα φορτία, είναι παρόμοια με αυτή των μετασχηματιστών. Οι συναρτήσεις μεταφοράς και τα μοντέλα υπολογίστηκαν παρόμοια με την ενότητα 1.5.3.5.

1.5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

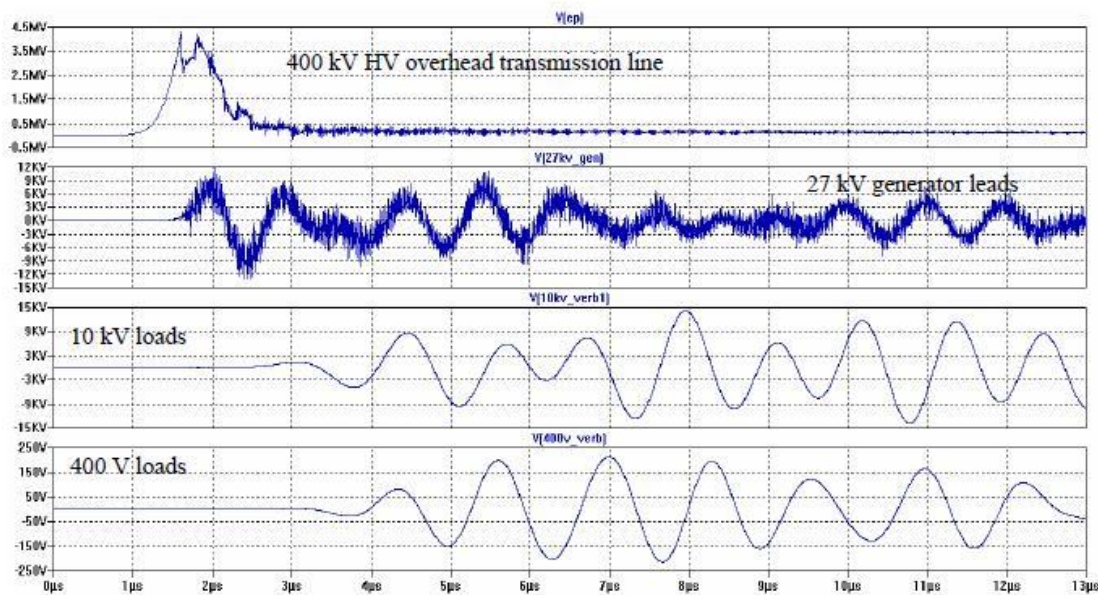
Οι αριθμητικές προσομοιώσεις διεξάγονται από ένα δικτυακό πρόγραμμα ανάλυσης (SPICE code). Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι διάφορες απειλές που εμφανίζονται οφείλονται στις τρεις συνιστώσες του ρεύματος κεραυνού. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι τρεις συνιστώσες διαφέρουν τόσο ως προς την μεταφερόμενη ενέργεια όσο και ως προς την χρονική κλίση, είναι σημαντικό να εκτιμήσουμε το κρουστικό ρεύμα που δημιουργεί την μεγαλύτερη απειλή. Ως εκ τούτου, οι προσομοιώσεις θα πρέπει να εφαρμοστούν και για τις τρεις συνιστώσες ρεύματος του κεραυνού.

Επιπροσθέτως, εξίσου σημαντικός για την προσομοίωση είναι και ο τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης παραγωγής ρεύματος. Συνήθως, αν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο, τότε είναι παράλληλη με το εφεδρικό ηλεκτρικό δίκτυο από πλευράς επιδράσεων του κεραυνού και συνεπώς λειτουργεί σαν ένα είδος βαθυπερατού φίλτρου. Εδώ, το πρώτο αρνητικό πλήγμα οδηγεί στις μέγιστες διαταραχές στα επίπεδα τάσης των 10kV και 400kV. Στην περίπτωση μιας αποσυνδεδεμένης γεννήτριας, δηλαδή όταν το εφεδρικό σύστημα ενέργειας της εγκατάστασης παραγωγής τροφοδοτείται το ίδιο διαμέσου της εναέριας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης, το επακόλουθο αρνητικό πλήγμα με τις υψηλότερες συχνότητες αποτελεί την μεγαλύτερη απειλή.

Γενικά, μια εγκατάσταση παραγωγής ρεύματος είναι μια πολύπλοκη διάταξη από διατεταγμένα συντονισμένα κυκλώματα, που φέρουν ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών συχνοτήτων (Εικόνα 1.5.4.1).

Εικόνα 1.5.4.1. Κυματομορφές για μεταβατικές τάσεις σε διαφορετικά σημεία και σε διαφορετικά επίπεδα τάσης για μια δεδομένη λειτουργία μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας (η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο).

(Πηγή: Kern *et al* 2010)



Κάθε φορτίο ή μετασχηματιστής ήδη σχηματίζει ένα συντονισμένο κύκλωμα από μόνο του, δημιουργώντας επιπλέον κυκλώματα συντονισμού με τα συνδεδετικά φορτία. Όλα αυτά τα κυκλώματα εξαρτώνται το ένα από το άλλο και επηρεάζουν τον εαυτό τους. Συνεπώς, η ανεξάρτητη ανάλυση των παραμέτρων, π.χ. η διερεύνηση της διακύμανσης ενός συνδεδετικού φορτίου, δεν μπορεί να αξιολογηθεί ξεχωριστά, αλλά μόνο σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους. Τελικά, αναφορικά με τα συμπεράσματα που αφορούν στο βέλτιστο επίπεδο μιας συγκεκριμένης παραμέτρου, αυτά δεν μπορούν να διατυπωθούν με απόλυτο τρόπο, γιατί η κάθε παράμετρος εξαρτάται από την μεγάλη μεταβλητότητα των υπολοίπων.

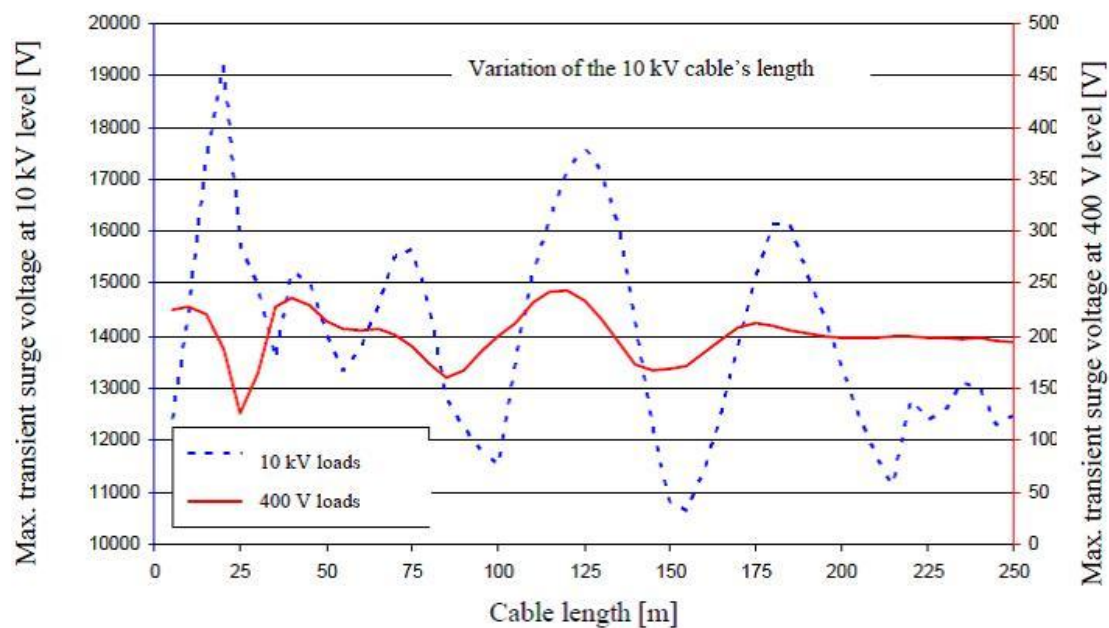
Η σύζευξη από τα καθοδικά επίπεδα τάσης προς τα αμέσως υψηλότερα επίπεδα είναι συνήθως τόσο χαμηλή, ώστε να μπορεί να παραμεληθεί σε μια πρώτη προσέγγιση. Επίσης, κάθε μετασχηματιστής δημιουργεί απόσβεση στο επόμενο επίπεδο τάσης. Η τιμή της εξασθένησης δίνεται από την χαρακτηριστική μεταφοράς της χωρητικότητας στο υψηλότερο εύρος συχνοτήτων και όχι από τον κλασικό λόγο μεταφοράς. Συνεπώς, η αποτελεσματική εξασθένηση μιας διαταραχής μπορεί να είναι μικρότερη από τον δεδομένο λόγο μεταφοράς, έτσι ώστε η διαταραχή να κυριαρχεί περισσότερο στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Τέλος, τόσο τα είδη όσο και ο αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων στα διαφορετικά επίπεδα τάσης και κυρίως στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο τάσης επηρεάζουν επίσης την διαταραχή. Γενικότερα, είτε οι κινητήρες υψηλής ισχύος είτε μεγάλος αριθμός κινητήρων δημιουργούν επίσης εξασθένηση.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης παρουσιάζονται σε δύο παραδείγματα. Η Εικόνα 1.5.4.1 δείχνει το αποτέλεσμα του πλήγματος κεραυνού (το αρνητικό επακόλουθο πλήγμα) σε μια απόσταση 25m μακριά από την εγκατάσταση παραγωγής ρεύματος για διαφορετικά επίπεδα τάσης (τρία φορτία με διαφορετική ισχύ στο επίπεδο 10kV, 20 φορτία στο επίπεδο 400 V). Η γεννήτρια της εγκατάστασης παραγωγής ρεύματος είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει ότι μετά από 1,52 μs λαμβάνει χώρα μια διάσπαση στον τελευταίο μονωτήρα της εναέριας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης, ενώ μετά από 0,1μs ακολουθεί διάσπαση στον κύριο αναστολέα υπέρτασης. Και τα δυο ηλεκτρικά τόξα απορροφούν το κύριο κομμάτι από την ενέργεια του κεραυνού. Συνεπώς, για φορτία 10 kV, οι μέγιστες μεταβατικές τάσεις είναι 14,2 kV σε χρόνο 7,94 μs ενώ για τα φορτία 400 V οι μέγιστες μεταβατικές τάσεις είναι 216 V σε χρόνο 6,98 μs. Όμως, πρέπει να αναφερθεί πως σε άλλες περιπτώσεις φορτίου, οι τάσεις μπορεί να είναι εντυπωσιακά υψηλότερες. Περαιτέρω προσομοιώσεις δείχνουν πως οι μεταβατικές τάσεις αυξάνονται σημαντικά εάν δεν υπάρχει αναστολέας

υπέρτασης ή δεν λαμβάνονται υπόψη τα ηλεκτρικά τόξα που προκαλούνται από τις διασπάσεις του μονωτήρα όπως και ο αναστολέας υπέρτασης.

Το δεύτερο σενάριο δείχνει την επίδραση του μήκους αγωγού στην συμπεριφορά της ταλάντωσης και το μέγιστο επίπεδο της μεταβατικής τάσης κεραυνού (Εικόνα 1.5.4.2).

Εικόνα 1.5.4.2. Μεταβατικές τάσεις για φορτία 10 kV και 400V που εξαρτώνται από το μήκος του αγωγού 10 kV ανάμεσα στον εφεδρικό μετασχηματιστή ενέργειας και τον ζυγό του μετασχηματιστή.
(Πηγή: Kern *et al* 2010)



Κεφάλαιο 2. Αναχαίτιση κεραυνού και προστασία εναέριων γραμμών μεταφοράς

Η προστασία των εναέριων γραμμών μεταφοράς από τις προσπτώσεις των κεραυνών στους φασικούς αγωγούς παρέχεται από τους αγωγούς προστασίας, οι οποίοι αναχαιτίζουν το καθοδικό πλήγμα μέσω μιας ανοδικής συνδετικής εκκένωσης από απόσταση (απόσταση πλήγματος), εντός των ορίων μιας ακτίνα η οποία συνήθως αποκαλείται ελκτική ακτίνα ή εγκάρσια απόσταση. Όμως, υπάρχει πάντα η πιθανότητα αποτυχίας της προστασίας, που σχετίζεται με κεραυνικά περιστατικά σχετικά χαμηλής εντάσεως. Συνεπώς, μπορεί να προσδιοριστεί ένα εγκάρσιο εύρος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς, που ονομάζεται εύρος σφάλματος προστασίας, μέσα στο οποίο ένας κατερχόμενος κεραυνός μπορεί να πλήξει τους αγωγούς φάσης. Το εύρος σφάλματος ελαττώνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη κεραυνική ένταση, ενώ το μέγιστο ρεύμα όλων των πιθανών κεραυνικών πληγμάτων που μπορεί να καταλήξουν στους αγωγούς φάσης, αντιστοιχώντας σε μηδενικό εύρος σφάλματος προστασίας, ονομάζεται μέγιστο ρεύμα σφάλματος προστασίας.

2.1 Πιθανότητα αναχαίτισης κεραυνού και απόδοση προστασίας εναέριων γραμμών μεταφοράς

Στην ανάλυση προστασίας των γραμμών μεταφοράς εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως τα κλασικά ηλεκτρομαγνητικά μοντέλα, τα οποία θεωρούν την απόσταση πλήγματος απλά ως συνάρτηση του αναμενόμενου μεγίστου ρεύματος κεραυνού. Ωστόσο, προσφάτως, έχει εισαχθεί μια στατιστική προσέγγιση στην ανάλυση προστασίας, η οποία χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μοντέλο κεραυνικής πρόσπτωσης, που προκύπτει από πειράματα υπό κλίμακα. Στην ανάλυση της παρούσας ενότητας το στατιστικό μοντέλο

εφαρμόζεται στην ανάλυση προστασίας εναέριων γραμμών μεταφοράς έτσι ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση της προστασίας αυτών και καταδεικνύεται πως το εύρος και η μέγιστη ένταση σφάλματος προστασίας ποικίλουν ανάλογα με την πιθανότητα αναχαίτισης κεραυνών. Στο σκηνικό αυτό διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο οι επιδράσεις των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς και η κατανομή των μεγίστων τιμών του ρεύματος κεραυνού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του στατιστικού μοντέλου με εκείνα που απορρέουν από την εφαρμογή διαφόρων ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων στην ανάλυση προστασίας τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς, κυρίως του ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Εξίσου σημαντικός είναι και ο βαθμός ποιοτικής και ποσοτικής συμφωνίας και συνέπειας με τις επιτόπιες παρατηρήσεις.

2.2 Ανάλυση προστασίας βάσει στατιστικού μοντέλου

Η κεραυνική πρόσπτωση αποτελεί ένα στοχαστικό φαινόμενο, οπότε οι βασικές παράμετροι που εμπλέκονται στην ανάλυση προστασίας, δηλαδή η απόσταση πλήγματος και η ελκτική ακτίνα, πρέπει να θεωρηθούν ως μεταβαλλόμενες στατιστικές ποσότητες, εκτός από το ύψος του αντικειμένου που έχει πληγεί και την μέγιστη κεραυνική ένταση, με την πιθανότητα αναχαίτισης (πιθανότητα ανερχόμενης συνδετικής εκκένωσης) (Mikropoulos & Tsovilis 2008, Mikropoulos & Tsovilis 2009a, Mikropoulos & Tsovilis 2010a).

Οι κατανομές πιθανότητας για αυτές τις δυο βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους έχουν προκύψει με τη βοήθεια πειραμάτων υπό κλίμακα (Mikropoulos & Tsovilis 2008). Η κατανομή της ακτίνας αναχαίτισης (εγκάρσια απόσταση από το αντικείμενο όπου συμβαίνει το κεραυνικό πλήγμα) προσεγγίζεται ικανοποιητικά από μια κανονική κατανομή και μπορεί να εκφραστεί από μια μέση τιμή R_{ci} , που ονομάζεται εφεξής κρίσιμη ακτίνα αναχαίτισης και μια τυπική απόκλιση σ (Mikropoulos & Tsovilis 2008):

$$\left(\frac{R_{ci}, \sigma}{D}\right) = c_1 \ln\left(\frac{h}{D}\right) + c_2$$

(εξίσωση 2.2.1)

όπου

$h(m)$ είναι το ύψος του αντικειμένου που έχει πληγεί,

$D(m)$ είναι η απόσταση πλήγματος από την επιφάνεια του εδάφους και

οι συντελεστές c_1, c_2 και σ (σε μορφή συνάρτησης) δίνονται στον Πίνακα 2.2.1.

Πίνακας 2.2.1. Συντελεστές c_1, c_2 και σ (σε μορφή συνάρτησης).

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

Negative Lightning		
c_1	c_2	$\sigma\%$
0.272	1.24	$5.0(h/D)^{-0.43}$

Η εξίσωση 2.2.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση προστασίας χρησιμοποιώντας μια γνωστή σχέση μεταξύ της απόστασης του πλήγματος από την επιφάνεια του εδάφους (D) και της μέγιστης κεραυνικής έντασης (I):

$$D = AI^{0.65}$$

Μια εφαρμογή της εξίσωσης 2.2.1 με την υιοθέτηση (Love 1973) του

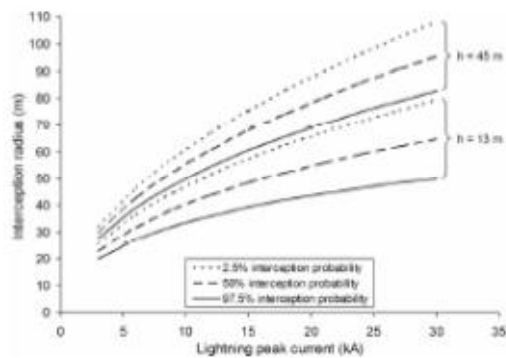
$$D = 10I^{0.65}$$

απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2.1, όπου η ακτίνα αναχαίτισης σχεδιάζεται ως μια συνάρτηση της μέγιστης κεραυνικής έντασης για διαφορετικές πιθανότητες αναχαίτισης. Προφανώς, η ακτίνα αναχαίτισης αυξάνεται όσο μεγαλώνει η

μέγιστη κεραυνική ένταση και το ύψος του αγωγού και είναι μεγαλύτερη για χαμηλότερες πιθανότητες αναχαίτισης.

Εικόνα 2.2.1. Η ακτίνα αναχαίτισης σαν συνάρτηση της μέγιστης κεραυνικής εντάσεως για διαφορετικές πιθανότητες αναχαίτισης.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Υιοθετώντας την ανάλυση προστασίας του Rizk (1990), σε μια εναέρια γραμμή μεταφοράς θα προκύψει σφάλμα προστασίας όταν το κατερχόμενο κεραυνικό μέτωπο εισέλθει στο εύρος σφάλματος προστασίας (W), που δίνεται από την εξίσωση 2.2.2:

$$W = R_p - R_m + \Delta R$$

όπου

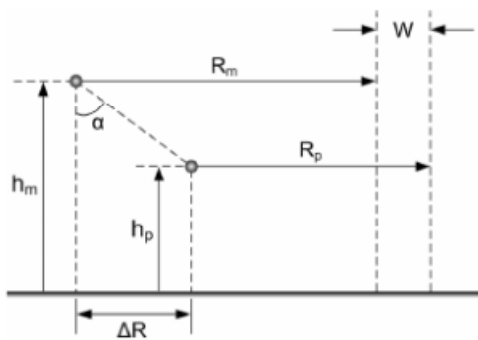
R_m είναι η ακτίνα αναχαίτισης του αγωγού προστασίας,

R_p είναι η ακτίνα αναχαίτισης και αγωγού φάσης και

ΔR είναι η οριζόντια διαχωριστική απόσταση ανάμεσα στον αγωγό προστασίας και τον αγωγό φάσης σύμφωνα με την Εικόνα 2.2.2.

Εικόνα 2.2.2. . Ανάλυση προστάσις των εναέριων γραμμών μεταφοράς, όπου h_m και h_p είναι το ύψος των αγωγών προστάσις και φάσης, αντιστοίχως, R_m και R_p είναι η ακτίνα αναχαίτισης των αγωγών προστάσις και φάσης, αντιστοίχως, α είναι η γωνία προστάσις, ΔR είναι η οριζόντια διαχωριστική απόσταση ανάμεσα στον αγωγό προστάσις και τον αγωγό φάσης και W είναι το εύρος σφάλματος προστάσις.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Από τις εξισώσεις 2.2.1 και 2.2.2, με τη χρήση των κρίσιμων ακτινών αναχαίτισης του αγωγού προστάσις και του αγωγού φάσης, το εύρος σφάλματος προστάσις μπορεί να υπολογιστεί ως (εξίσωση 2.2.3):

$$W = c_1 D \ln(h_p/h_m) + \Delta R.$$

Ωστόσο, ανάλογα με την γεωμετρία της γραμμής μεταφοράς, η απόσταση πλήγματος και η ακτίνα αναχαίτισης του αγωγού προστάσις μπορούν να επηρεαστούν από την παρουσία του γειτονικού αγωγού φάσης (Mikropoulos *et al* 2008, Mikropoulos & Tsovilis 2010a).

Πράγματι, η ανοδική εκκένωση από κάποιον γειτονικό αγωγό φάσης, που τροποποιεί την έκταση της εκδήλωσης της συνδετικής ανοδικής εκκένωσης από τον αγωγό προστάσις, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόστασης

πλήγματος και της ακτίνας αναχαίτισης του αγωγού προστασίας (Mikropoulos *et al* 2008, Mikropoulos & Tsovilis 2010a). Συνεπώς, όταν λαμβάνονται υπόψιν οι επιδράσεις της εγγύτητας, τότε το W αυξάνεται και η εξίσωση 2.2.3 γίνεται:

$$W = (1-\mu)D_{c1} \ln(h_p/h_m) + \Delta R \quad (\text{εξίσωση 2.2.4})$$

όπου

$$\mu = \frac{0.14(h_m/D)^{1.3}}{\ln(h_m/h_p)}$$

Υιοθετώντας $D = 10I^{0.65}$ (Love 1973), η εξίσωση 2.2.4 γίνεται:

$$W = 2.72I^{0.65} \ln(h_p/h_m) + 0.01h_m^{1.3} + \Delta R$$

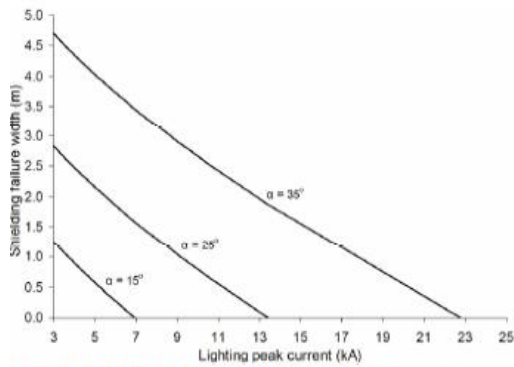
(εξίσωση 2.2.5)

όπου τα h_m , h_p και ΔR ορίζονται στην Εικόνα 2.2.2.

Η Εικόνα 2.2.3 δείχνει την διακύμανση του εύρους σφάλματος προστασίας (W), με μέγιστο ρεύμα κεραυνού (I), σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.5, με παράμετρο την προστατευτική γωνία. Το W μειώνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη κεραυνική ένταση, με τον ρυθμό μείωσης να είναι χαμηλότερος για μεγαλύτερες γωνίες προστασίας. Όπως είναι αναμενόμενο, για μια δεδομένη μέγιστη κεραυνική ένταση, το W αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας προστασίας.

Εικόνα 2.2.3. Το εύρος σφάλματος προστασίας συναρτήσει της μέγιστης κεραυνικής έντασης σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.5. Η γωνία προστασίας α έχει τον ρόλο της μεταβλητής, ενώ $h_m=30\text{m}$ και $h_p=22\text{m}$.

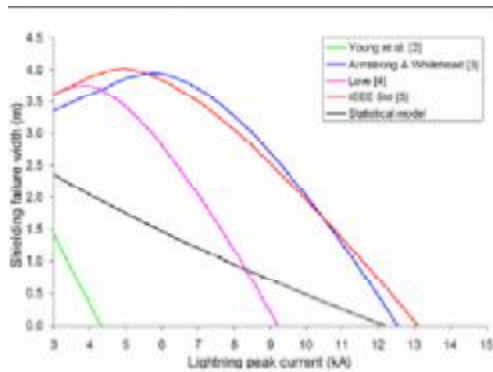
(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



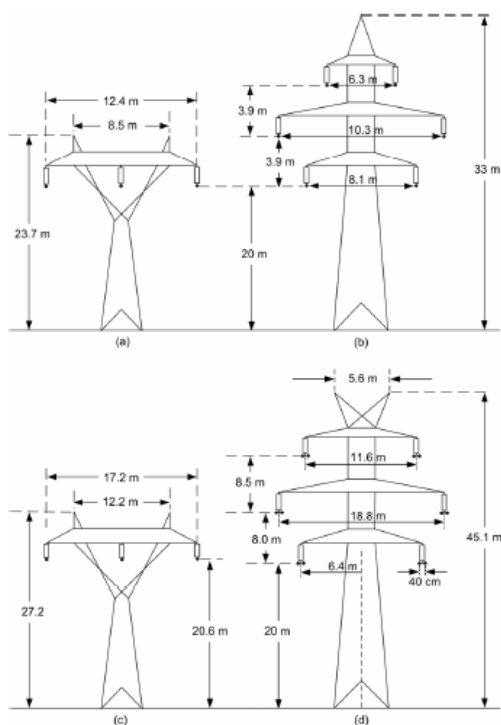
Η Εικόνα 2.2.4 δείχνει την διακύμανση του W , με μέγιστη κεραυνική ένταση σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.5 για τον άνω αγωγό φάσης μιας τυπικής εναέριας γραμμής διπλού κυκλώματος 150 kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψιν το μέσο ύψος κατά μήκος της γραμμής. Η γεωμετρία της γραμμής φαίνεται στην Εικόνα 2.2.5 (b). Η Εικόνα 2.2.4 επίσης δείχνει την διακύμανση του W με την μέγιστη κεραυνική ένταση, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή στην ανάλυση προστασίας των ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων που παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.1. Όλα τα κεραυνικών προσπτώσεων συμφωνούν στην πρόβλεψη ότι το W μειώνεται καθώς η μέγιστη κεραυνική ένταση αυξάνεται. Όμως, υπάρχουν διαφορές στο W ανάμεσα στα μοντέλα, τόσο όσον αφορά στην τιμή όσο και στον ρυθμό μείωσης με το μέγιστο κεραυνικό ρεύμα, το οποίο λογικά θα ποίκιλλε ανάλογα με την γεωμετρία της γραμμής μεταφοράς.

Εικόνα 2.2.4. Το εύρος σφάλματος προστασίας συναρτήσκει της μέγιστης κεραυνικής εντάσεως, για την γεωμετρία της γραμμής που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2.5 (b).

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Εικόνα 2.2.5. Τυπικοί πυλώνες των 150kV (a), (b) και 400kV (c), (d) γραμμών του ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Η «κοιλιά» του αγωγού προστασίας και των αγωγών φάσης είναι 5,5μ και 8,6μ, αντιστοίχως. (Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Πίνακας 2.2.1. Ηλεκτρομαγνητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση πορτασίας.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

Electrogeometric model	$S = A r^B = \gamma D^C$		
	A	B	γ
Young et al. [2]	27 γ	0.32	1 for $h < 18$ m
			$\frac{444}{482-h}$ for $h > 18$ m
Armstrong & Whitehead [3]	6.72	0.80	1.11
Love [4]	10	0.65	1
IEEE Std 1243 [5]	10	0.65	$1/\beta^m$

S, D are the striking distance to transmission line conductors and earth surface, respectively.
 $m = 0.36 + 0.17 \ln(43-h)$ for $h < 40$ m, $\beta = 0.55$ for $h > 40$ m where h is the phase conductor height.

Από τις Εικόνες 2.2.3 και 2.2.4 είναι προφανές πως υπάρχει ένα κρίσιμο ρεύμα που αντιστοιχεί σε μηδενικό εύρος σφάλματος προστασίας, το οποίο αποκαλείται μέγιστο ρεύμα σφάλματος προστασίας (I_{MSF}). Έτσι, πλήγματα κεραυνών με μέγιστο ρεύμα μεγαλύτερο του I_{MSF} αναχαιτίζονται από τους αγωγούς προστασίας. Ωστόσο, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από την Εικόνα 2.2.4, το I_{MSF} διαφέρει σημαντικά στα διάφορα μοντέλα που εφαρμόζονται στην ανάλυση προστασίας (Mikropoulos & Tsovilis 2009b).

Με βάση την εξίσωση 2.2.5, το I_{MSF} (kA) μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί (Mikropoulos & Tsovilis n.d.):

$$I_{MSF} = \left[\frac{\Delta R + 0.01 h_m^{1.3}}{2.72 \ln(h_m/h_p)} \right]^{1/0.65}$$

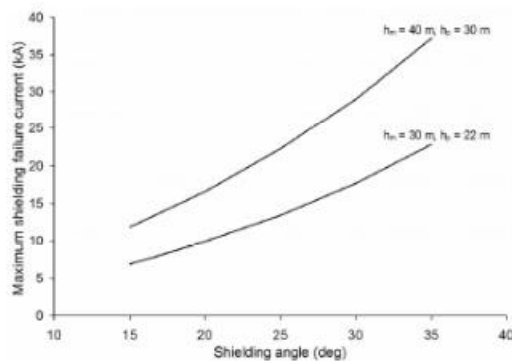
(εξίσωση 2.2.6)

όπου τα h_m , h_p και ΔR ορίζονται στην Εικόνα 2.2.2.

Η Εικόνα 2.2.6 δείχνει την μεταβολή του I_{MSF} με την γωνία προστασίας, θεωρώντας ως παράμετρο το ύψος της γραμμής μεταφοράς. Το I_{MSF} αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας προστασίας και του ύψους της γραμμής μεταφοράς και αυτές οι επιδράσεις είναι πιο έντονες σε σχετικά μεγαλύτερες γωνίες προστασίας.

Εικόνα 2.2.6. Μέγιστη ένταση ρεύματος σφάλματος προστασίας ως συνάρτηση της γωνίας προστασίας σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.6, θεωρώντας ως παράμετρο το ύψος της γραμμής μεταφοράς.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

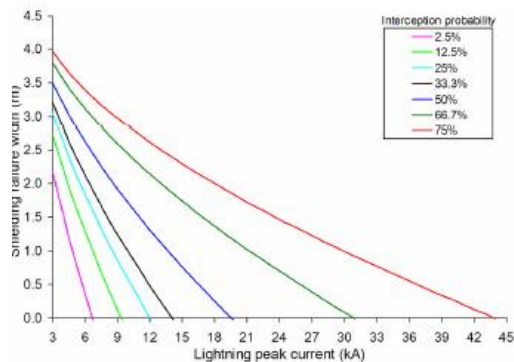


Οι εξισώσεις 2.2.5 και 2.2.6 έχουν προκύψει από την εφαρμογή των κρίσιμων ακτινών αναχαίτισης του αγωγού προστασίας και του αγωγού φάσης στην ανάλυση προστασίας των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Όμως, από την εξίσωση 2.2.2 είναι προφανές πως το εύρος σφάλματος προστασίας (W στην Εικόνα 2.2.2) είναι μια στατιστική ποσότητα, αφού και οι δυο ακτίνες αναχαίτισης R_m και R_p μεταβάλλονται με την πιθανότητα αναχαίτισης σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.1. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2.7, όπου, χρησιμοποιώντας την κρίσιμη ακτίνα αναχαίτισης του αγωγού φάσης, το W απεικονίζεται ως συνάρτηση της μέγιστης κεραυνικής έντασης με παράμετρο την πιθανότητα αναχαίτισης του αγωγού προστασίας. Καθώς υψηλότερη πιθανότητα αναχαίτισης αντιστοιχεί σε μικρότερη ακτίνα αναχαίτισης (Εικόνα

2.2.1), όταν αυξάνεται η πιθανότητα αναχαίτισης του αγωγού προστασίας, το εύρος του γίνεται πιο πλατύ και λιγότερο ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της μέγιστης κεραυνικής έντασεως. Συνεπώς, το I_{MSF} επίσης μεταβάλλεται με την πιθανότητα αναχαίτισης, όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς από την Εικόνα 2.2.7.

Εικόνα 2.2.7. Το εύρος σφάλματος προστασίας σε συνάρτηση με την μέγιστη κεραυνική ένταση, με την πιθανότητα αναχαίτισης του αγωγού προστασίας ως παράμετρο και $h_m=30m$, $h_r=22m$ γωνία προστασίας 25^0 .

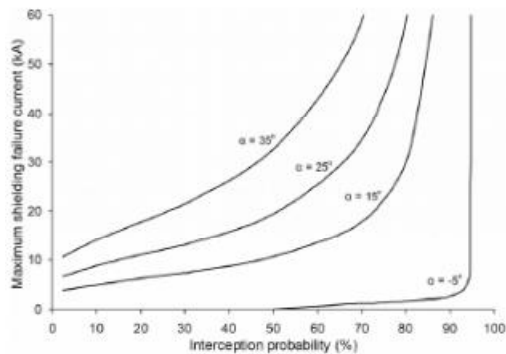
(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Το ίδιο συνάγεται και από την Εικόνα 2.2.8, όπου απεικονίζεται η μεταβολή του I_{MSF} με την πιθανότητα αναχαίτισης. Από την Εικόνα 2.2.8 καθίσταται προφανές πως το I_{MSF} αυξάνεται με την πιθανότητα αναχαίτισης, τείνοντας προς ασύμπτωτες υψηλότερων πιθανοτήτων αναχαίτισης.

Εικόνα 2.2.8. Μεταβολή της μέγιστης έντασης σφάλματος προστασίας με την πιθανότητα αναχαίτισης του αγωγού προστασίας, θεωρώντας την γωνία προστασίας α ως παράμετρο, $h_m=30m$ και $h_r=22m$.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



2.3 Μεθοδολογία για τον υπολογισμό του ρυθμού των σφαλμάτων προστασίας

Ο ετήσιος αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων στους αγωγούς φάσης ανά 100km μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς, δηλαδή η ρυθμός του σφάλματος προστασίας (SFR) δίνεται ως (IEEE 1997):

$$SFR = 0.2 N_g \int_0^{I_{MSF}} W(I) f(I) dI$$

(εξίσωση 2.3.1)

όπου

N_g (flashes/km²/yr) είναι η πυκνότητα εκκενώσεων του εδάφους,

I_{MSF} (kA) είναι η μέγιστη ένταση σφάλματος προστασίας,

W (m) είναι είναι το εύρος σφάλματος προστασίας

και $f(I)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής της τάσης κεραυνού, η οποία μπορεί να διατυπωθεί ως (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005):

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln}I} \exp\left[-\frac{(\ln I - \ln \bar{I})^2}{2\sigma_{\ln}^2}\right]$$

(εξίσωση 2.3.2)

όπου I και σ_{\ln} είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του φυσικού αλγορίθμου της κεραυνικής εντάσεως, αντιστοίχως.

Ενδεικτικές τιμές για το I και σ_{\ln} είναι οι εξής (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005):

$I \leq 20$ kA, $\bar{I} = 61,1$ kA και $\sigma_{\ln} = 1,34$ ή

$I \geq 20$ kA, $\bar{I} = 33,3$ kA και $\sigma_{\ln} = 0,61$

Στη συνέχεια, ο ρυθμός πληγμάτων κεραυνών σε αγωγούς φάσης που καταλήγουν σε υπερπήδηση των μονωτήρων ή της μονώσεως της γραμμής (ρυθμός σφάλματος προστασίας διάσπασης – SFFOR) (flashovers/100km/yr), που χρησιμοποιείται μαζί με τον αντίστοιχο ανάστροφο ρυθμό (back flashover), για να προσδιοριστεί ο αναμενόμενος ρυθμός διακοπής ρευματοδότησης μιας γραμμής μεταφοράς, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής (IEEE 1997):

$$SFFOR = 0.2N_g \int_{I_c}^{I_{\text{max}}} W(I)f(I)dI$$

(εξίσωση 2.3.3)

όπου I_c (kA) είναι η κατώτατη μέγιστη κεραυνική ένταση που προκαλεί υπερπήδηση στην μόνωση της γραμμής, η οποία ισούται με (IEEE 1997):

$$I_c = 2(CFO)/Z_c$$

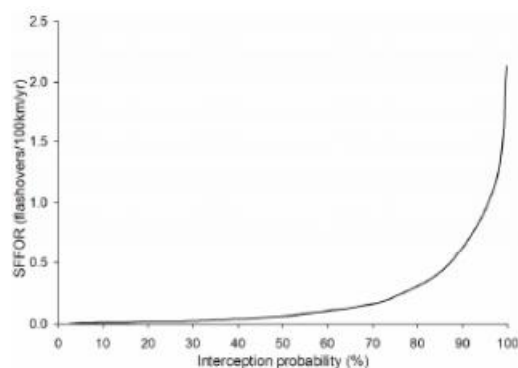
(εξίσωση 2.3.4)

όπου CFO (kV) είναι η κρίσιμη κρουστική τάση κεραυνών της γραμμής μόνωσης και Z_s (Ω) είναι η εμπέδηση υπέρτασης του αγωγού υπό συνθήκες φαινομένου corona.

Από την εξίσωση 2.3.3 συμπεραίνεται ότι το SFFOR είναι μια στατιστική ποσότητα αφού και το W και το I_{MSF} μεταβάλλονται με την πιθανότητα αναχαίτισης (Εικόνα 2.2.7 και Εικόνα 2.2.8). Αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.1, όπου, χρησιμοποιώντας της κρίσιμη ακτίνα αναχαίτισης του αγωγού φάσης, το SFFOR σχεδιάζεται σαν συνάρτηση της πιθανότητας αναχαίτισης του αγωγού προστασίας. Είναι προφανές πως το SFFOR αυξάνει σημαντικά με την πιθανότητα αναχαίτισης. Πρέπει να σημειωθεί επίσης πως ο ρυθμός αύξησης του SFFOR με την πιθανότητα αναχαίτισης λογικά θα διαφέρει αναλόγως της γεωμετρίας της γραμμής και της κατανομής της μεγίστης κεραυνικής εντάσεως, όπως άλλωστε συνάγεται και από την εξίσωση 2.3.3. Επιπλέον, είναι λογικό να συνδέσουμε τις χαμηλές ή υψηλές πιθανότητες αναχαίτισης κεραυνού με βραχυπρόθεσμες παρατηρήσεις SFFOR. Συνεπώς, για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης προστασίας μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς προτείνεται να εφαρμοστεί η εξίσωση 2.3.3 με την χρήση του κρίσιμου εύρους σφάλματος προστασίας W (εξίσωση 2.2.5) και το αντίστοιχο I_{MSF} όπως δίνεται από την εξίσωση 2.2.6.

Εικόνα 2.3.1. SFFOR συναρτήσε της πιθανότητας αναχαίτισης, με $h_m=30m$, $h_m=22m$, γωνία προστασίας 25° , $I_c=4kA$, $N_g=1$ flash/km/yr.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

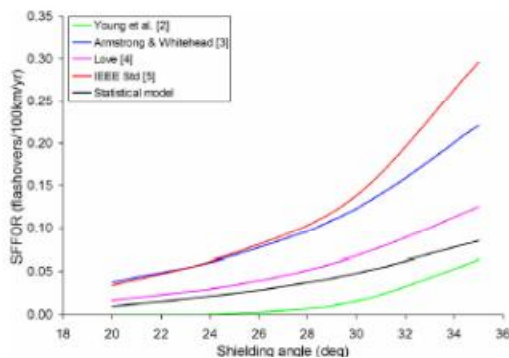


2.4 Υπολογισμοί SFFOR και συζήτηση

Οι Εικόνες 2.4.1 και 2.4.2 δείχνουν την μεταβολή του SFFOR με την γωνία προστασίας και το ύψος της γραμμής μεταφοράς, αντιστοίχως, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.2.5 και 2.2.6 στην εξίσωση 2.3.3 για την κατανομή του μεγίστου ρεύματος κεραυνού (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005). Οι Εικόνες 2.4.1 και 2.4.2 επίσης περιλαμβάνουν υπολογιστικά αποτελέσματα για τον SFFOR από την εφαρμογή ηλεκτρογεωμετρικών προτύπων. Όλα τα πρότυπα συμφωνούν στην πρόβλεψη πως το SFFOR αυξάνεται με την γωνία προστασίας (Εικόνα 2.4.1) και το ύψος της γραμμής μεταφοράς (Εικόνα 2.4.2). Αυτό λογικά συνδέεται με τις μεταβολές των W και I_{MSF} με την γεωμετρία της γραμμής μεταφοράς (Εικόνες 2.2.3 και 2.2.6) και έχει επίσης αποδειχθεί από προσομοιώσεις (He *et al* 2005, Vahidi *et al* 2008).

Εικόνα 2.4.1. Μεταβολή του SFFOR με την γωνία προστασίας, όπου $h_m=30m$, $h_r=22m$, $I_c=4kA$, $N_g=1flash/km/yr$.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

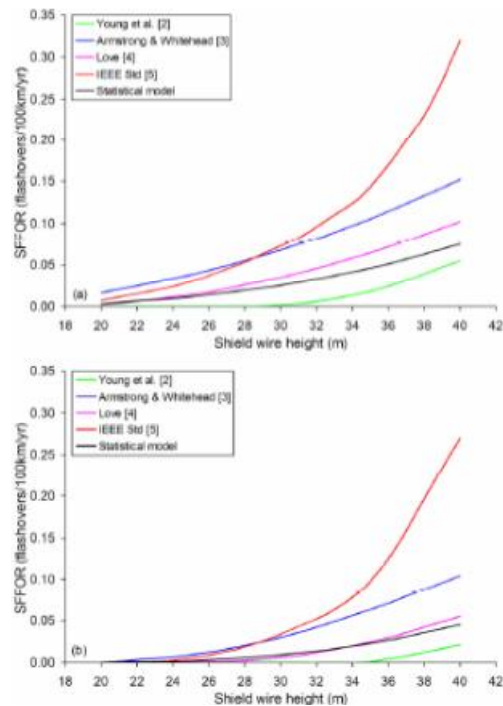


Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο το SFFOR μειώνεται με την αύξηση του I_c (Εικόνα 2.4.2). Όμως, πρέπει να σημειωθεί πως, για σταθερές παραμέτρους γραμμής, υπάρχει μια μεγάλη διακύμανση στο SFFOR ανάμεσα στα μοντέλα,

τόσο αναφορικά με την τιμή και τον ρυθμό της αύξησης όσο αυξάνεται η γωνία προστασίας (Εικόνα 2.4.1) όσο και με το ύψος της γραμμής μεταφοράς (Εικόνα 2.4.2), ειδικά στις περιπτώσεις των σχετικά μεγαλύτερων γωνιών προστασίας και υψηλότερων γραμμών μεταφοράς.

Εικόνα 2.4.2. Μεταβολή του SFFOR με το ύψος του αγωγού προστασίας, όπου $h_r/h_m=0,75$, γωνία προστασίας 25° , $N_g=1\text{flash}/\text{km}/\text{yr}$, (a) $I_c=4\text{kA}$, (b) $I_c=8\text{kA}$.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)



Από τις Εικόνες 2.4.1 και 2.4.2 είναι προφανές πως το SFFOR είναι πολύ πιο ευαίσθητο ως προς την γωνία προστασίας και τις διακυμάνσεις του ύψους των γραμμών μεταφοράς, σύμφωνα με το πρότυπο (IEEE 1997), το οποίο αποδίδει τις υψηλότερες τιμές SFFOR ανάμεσα στα μοντέλα. Το δεύτερο μπορεί να αποδοθεί σε ένα λιγότερο ευαίσθητο εύρος σφάλματος προστασίας στην μέγιστη κεραυνική ένταση (Εικόνα 2.2.4) και στις μεταβολές της γεωμετρίας των γραμμών μεταφοράς.

Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να συναχθούν από τον Πίνακα 4.1 , ο οποίος δείχνει τον εκτιμώμενο SFFOR τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς των 150kV και 400kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Η γεωμετρία των γραμμών φαίνεται στην Εικόνα 2.2.5. Αυτά τα αποτελέσματα αναφέρονται στο μέσο ύψος γραμμών και προέκυψαν με $N_g=4\text{flashes/km/yr}$ και με την χρήση της κατανομής της μέγιστης κεραυνικής έντασης όπως προτείνεται από την (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005). Από τον Πίνακα 4.1 είναι προφανές πως γραμμές απλού κυκλώματος αναμένονται να έχουν καλύτερη απόδοση προστασίας από γραμμές διπλού κυκλώματος. Στις γραμμές διπλού κυκλώματος το SFFOR βρέθηκε μεγαλύτερο για των άνω αγωγό φάσης και μηδέν για τον κάτω αγωγό φάσης. Συνεπώς, για την βελτίωση της απόδοσης των γραμμών διπλού κυκλώματος όσον αφορά στο σφάλμα προστασίας πρέπει να εγκατασταθούν απαγωγείς γραμμών στους άνω και μέσους αγωγούς φάσης.

Πίνακας 4.1. SFFOR (υπερπηδησεις/100km/yr) τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς των 150 kV και 400kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς.

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

Lightning attachment model	150 kV single circuit $I_L = 4 \text{ kA}$	150 kV double circuit $I_L = 4 \text{ kA}$	400 kV single circuit $I_L = 9.5 \text{ kA}$	400 kV double circuit $I_L = 8.5 \text{ kA}$
Young et al. [2]	0	0	0	0
Armstrong et al. [3]	0.019	0.345	0	0.183
Love [4]	0	0.149	0	0.041
IEEE Std [5]	0.003	0.310	0	0.301
Statistical model	0	0.106	0	0.032

Για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς με παραμέτρους που αναφέρονται στον Πίνακα 4.2, ο Πίνακας 4.3 δείχνει τον εκτιμώμενο SFFOR και τον πραγματικό SFFOR για $N_g=4,02 \text{ flashes/km/yr}$ (Eriksson 1987, Whitehead 1974). Στους υπολογισμούς εφαρμόστηκε η κατανομή μέγιστης κεραυνικής έντασης που προτείνεται από την (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005).

Πίνακας 4.2. Παράμετροι των εναέριων γραμμών μεταφοράς (Eriksson 1987, Whitehead 1974).

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

No.	Code	I_c (kA)	h_m (m)	h_p (m)	α (deg)
1	CIGRE 30	8.3	28.0	16.0	15.0
2	CIGRE 39	10.5	29.0	16.0	-15.0
3	CIGRE 40	8.7	27.0	19.0	14.0
4	CIGRE 63/75	9.6	32.0	23.0	18.0
5	CIGRE 88/89	11.0	23.6	18.4	19.0
6	TVA 1	11.7	23.0	12.0	10.4
7	TVA 2	11.7	28.0	17.0	10.4
8	EPI K	5.9	31.0	23.0	0.0
9	EPI D	8.6	43.0	24.0	31.0
10	CIGRE 31	8.7	43.0	24.0	22.0
11	CIGRE 85/86	6.9	43.5	30.0	10.5
12	CIGRE 109	11.1	50.0	29.0	26.0

Πίνακας 4.3. Πραγματικό και εκτιμώμενο SFFOR (flashover/100km/yr) για κατανομή μεγίστου κεραυνικού ρεύματος σύμφωνα με την (Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee 2005).

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

Table V: Actual and estimated SFFOR(flashovers/100km/yr) for the lightning peak current distribution suggested in [19].

Line No.	1-3, 6, 7	4	8	9	10	11	12
Actual SFFOR	0	0	0.45	5.35	2.30	2.02	5.65
Young et al. [2]	0	0	0	0.389	0.001	0	0.303
Ainslie et al. [3]	0	0.010	0.001	0.968	0.258	0.090	0.653
Love [4]	0	0	0	0.479	0.093	0.034	0.307
IEEE Std [5]	0	0.011	0	1.690	0.335	0.134	1.933
Statistical model	0	0	0	0.482	0.068	0.001	0.313

Για τις γραμμές μεταφοράς No.1-8, όλα τα μοντέλα γενικά συμφωνούν εκτιμώντας πως δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα προστασίας και αυτό συνάδει με τις επιτόπιες παρατηρήσεις των γραμμών No 1-7. Για τις γραμμές No.9-12 όλα τα μοντέλα αποδίδουν μη μηδενικά σφάλματα προστασίας, επίσης σε συμφωνία με τα επιτόπια δεδομένα. Όμως, οι εκτιμώμενες τιμές SFFOR είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές, ακόμα και με την χρήση στους υπολογισμούς της κατανομής μέγιστης έντασης κεραυνού με $I=24\text{kA}$ και $\sigma_{in}=0,72$ (Mousa & Srivastava 1989), το οποίο αποδίδει ψηλότερες τιμές SFFOR (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4. Πραγματικό και εκτιμώμενο SFFOR (flashovers/100km/yr) για κατανομή μέγιστης κεραυνικής εντάσεως σύμφωνα με (Mousa & Srivastava 1989).

(Πηγή: Mikropoulos & Tsovilis 2010b)

Line No.	1-3, 5-7	4	8	9	10	11	12
Actual SFFOR	0	0	0.45	5.35	2.30	2.02	5.65
Young et al. [2]	0	0	0	0.912	0.002	0	0.710
Armstrong et al. [3]	0	0.022	0.001	2.136	0.602	0.180	1.496
Love [4]	0	0	0	1.139	0.205	0.063	0.779
IEEE Std [5]	0	0.026	0	3.066	0.800	0.289	3.004
Statistical model	0	0	0	1.073	0.154	0.002	0.707

Γενικά από τους Πίνακες 4.3 και 4.4 μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι, για όλα τα μοντέλα, το εκτιμώμενο SFFOR βρίσκεται σε ποιοτική συμφωνία αλλά σε ποσοτική ασυνέπεια με τα επιτόπια δεδομένα. Αυτή η ασυμφωνία ανάμεσα στο εκτιμώμενο και το πραγματικό SFFOR μπορεί να οφείλεται στην αβεβαιότητα της κεραυνικής εκκένωσης στην γραμμή. Επομένως, οι πραγματικές τιμές SFFOR στους Πίνακες 4.3 και 4.4 πρέπει να θεωρηθούν ως ανώτατα όρια. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως η χειρότερη περίπτωση προσέγγισης του Eriksson (1987) για την εκτίμηση των αποδόσεων SFFOR δίνει αποτελέσματα σε συνέπεια με τα επιτόπια δεδομένα. Όμως, η προσέγγιση του Eriksson (1987) βασίζεται στην υπόθεση πως όλα τα κεραυνικά κρούσματα με μέγιστες εντάσεις χαμηλότερες του I_{MSF} καταλήγουν σε αγωγούς φάσης. Αυτό θεωρείται μη ρεαλιστικό ((Mousa & Srivastava 1989) και είναι βέβαιο πως απαιτούνται περισσότερα και πιο αξιόπιστα επιτόπια δεδομένα (Taniguchi *et al* 2009), προκειμένου να επικυρωθούν τα μοντέλα όσον αφορά την απόδοση προστασίας των εναέριων γραμμών μεταφοράς.

Από όλα τα παραπάνω συνάγεται ότι η αξιολόγηση της απόδοσης προστασίας των εναέριων γραμμών μεταφοράς είναι ένα δύσκολο έργο, όμως μπορεί να διευκολυνθεί με την βοήθεια ενός πρόσφατα αναπτυγμένου

λογισμικού (LPTL) (Mikropoulos *et al* 2010), το οποίο λειτουργεί ως εφαρμογή των Microsoft Windows και διαθέτει φιλική προς τον χρήστη διεπαφή με την χρήση γραφικών (<http://www.eng.auth.gr/hvl/>).

2.5 Προστασία εναέριων γραμμών από κεραυνούς με την χρήση απαγωγέων πολυθαλάμων και μονωτήρων.

Η προστασία των εναέριων γραμμών διανομής από ηλεκτρικούς σπινθήρες έχει μεγάλο παρελθόν και για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκαν ήδη από το 1886 απαγωγείς πολλαπλού παράλληλου διάκενου (gear type) για την προστασία του τηλεγραφικού συστήματος των 2 kV (Morey & Oehne 1908). Επίσης προτάθηκε η εγκατάσταση μια σειράς από διάκενα στους πόλους των εναέριων γραμμών διανομής (Austin 1932), ωστόσο, το κυρίως πρόβλημα αυτών των λύσεων είναι η περιορισμένη δυνατότητα καταστολής, οπότε δεν είναι αποτελεσματικές στις υψηλές τιμές του επακόλουθου ρεύματος.

Στην συνέχεια, μια πρότυπη συσκευή (αποκαλούμενη “Darverter”) αποτελούμενη από μεταλλικές επενδύσεις, οι οποίες ήταν τοποθετημένες κατά μήκος ενός ξύλινου πόλου (Darveniza 1976) βελτίωσε την ικανότητα καταστολής, εξαιτίας των ιδιοτήτων του ξύλου στην παραγωγή αερίων, ωστόσο η εφαρμογή της σε εναέριες γραμμές ήταν περιορισμένη.

Περαιτέρω, τα συστήματα με «πολύ-διάκενα» χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε πολύ γνωστούς απαγωγείς SiC, όταν συνδυάζονται με μη γραμμικό αντιστάτη σε σειρά για την προστασία εξοπλισμών σε υποσταθμούς (IEC Standard 99-1). Αλλά αυτοί οι απαγωγείς δεν είναι κατάλληλοι για την προστασία εναέριων γραμμών καθώς δεν μπορούν να αντέξουν τα άμεσα πλήγματα των κεραυνών. Τα συστήματα με «πολύ-διάκενα» είναι γνωστό επίσης ως εκτροπείς στα (καλύμματα) που βρίσκονται πάνω από το μηχανισμό ραντάρ στη μύτη του αεροπλάνου (Baldwin 1986).

Στο ίδιο μήκος κύματος, απαγωγείς με σύστημα με «πολύ-ηλεκτρόδια», το οποίο είναι βασισμένο στην επίδραση της εκκένωσης (Podporokin *et al* 2006) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προστασία των εναέριων γραμμών μέσης τάσης, όμως για γραμμές υψηλής τάσης δεν είναι κατάλληλα εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεών τους.

Τα προηγούμενα χρόνια, οι συγγραφείς ήταν πολύ ενεργοί στην ανάπτυξη απαγωγέων με το σύστημα των «πολυθαλάμων» (multi-chamber system – MCS) (Podporokin & Kalakutsky 2009) και είχαν σημειώσει επιτυχία στην παραγωγή νέων απαγωγέων, από 10 έως 35kV, καθώς και στην παραγωγή μιας πρωτότυπης κατασκευής που έχει οριστεί ως «απαγωγέας μονωτήρα με πολυθαλάμους» (multi-chamber insulator arrester – MCIA) (Podporokin 2009). Η εν λόγω κατασκευή συνδυάζει τις ιδιότητες και τις λειτουργίες ενός απαγωγέα και ενός μονωτήρα. Η εφαρμογή των MCIA κάνει δυνατή την προστασία των εναέριων γραμμών οποιουδήποτε επιπέδου τάσης από κεραυνούς και ειδικότερα, όσο ψηλότερη είναι η τάση της γραμμής τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μονάδων σε μια σειρά και συνεπώς, τόσο υψηλότερη είναι η χωρητικότητα του τόξου καταστολής του απαγωγέα μονωτήρα.

Στο πλαίσιο αυτό, υπάρχουν διαθέσιμα Διάφορα σχέδια μονωτήρων με ιδιότητες απαγωγέα. Πιο συγκεκριμένα, ένα MCIA είναι γενικώς μια κατασκευή γυαλιού, πορσελάνης ή σύνθετου μονωτήρα προσαρμοσμένου με ένα MCS. Η εγκατάσταση του MCS δίνει στον μονωτήρα ιδιότητες απαγωγέα χωρίς καμία επιδείνωση της μονωτικής του χωρητικότητας. Για αυτόν το λόγο, η εφαρμογή του MCIA σε εναέριες γραμμές καθιστά τον αγωγό προστασίας περιττό, ενώ το ύψος, το βάρος και το κόστος των ιστών ή των πυλώνων μειώνεται. Με ένα χαμηλότερο συνολικό κόστος και με μια καλύτερη προστασία από κεραυνούς, μια τέτοια γραμμή παρουσιάζει μειωμένο αριθμό σφαλμάτων, μειώνει τη ζημιά από λόγους μειωμένης παροχής ενέργειας και

μειώνει το κόστος συντήρησης. Ως εκ τούτου, οι MCIA υπόσχονται πολλά στην προστασία των εναέριων σιδηροδρομικών συστημάτων επικοινωνίας από άμεσα πλήγματα κεραυνών.

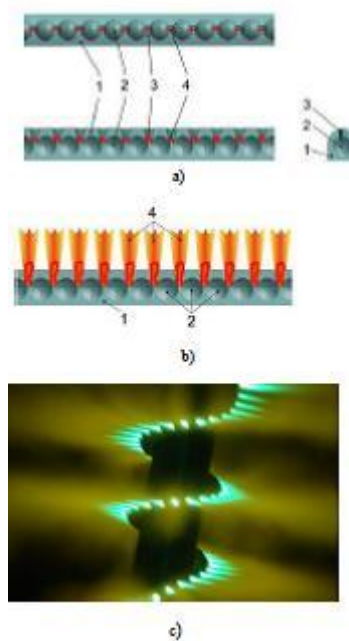
2.6 Το σύστημα «πολυθαλάμων»

2.6.1 Αρχή λειτουργίας MCS

Η βάση των απαγωγέων με «πολυθαλάμους» (multi-chamber arresters - MCA), συμπεριλαμβανομένου και του MCIA, είναι το MCS που φαίνεται στην Εικόνα 2.6.1.1. Αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων σε πυρίτιο, όπου οι τρύπες, που ανοίγονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και που διασχίζουν το πυρίτιο, λειτουργούν ως μικροσκοπικοί θάλαμοι εκκένωσης αερίων. Όταν, λοιπόν, εφαρμόζεται στον απαγωγέα μια υπερτασική διέγερση κεραυνού, εξουδετερώνονται τα διάκενα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Οι εκκενώσεις ανάμεσα στα ηλεκτρόδια γίνονται μέσα σε θαλάμους, με πολύ μικρό όγκο. Έτσι, η συνεπαγόμενη υψηλή πίεση οδηγεί εκκενώσεις σπινθήρων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια προς την επιφάνεια του μονωτικού σώματος και τελικά έξω, στην ατμόσφαιρα γύρω από τον απαγωγέα. Σημειώνεται ότι το κάψιμο ασφάλειας και η επιμήκυνση των εσωτερικών διόδων των ηλεκτροδίων οδηγούν σε μια αύξηση της συνολικής αντίστασης όλων των διόδων, δηλαδή του απαγωγέα, η οποία περιορίζει το ρεύμα υπερτασικής διέγερσης του κεραυνού.

Εικόνα 2.6.1.1. Σύστημα MCS: (a) διάγραμμα που δείχνει την στιγμή έναρξης της εκκένωσης, (b) διάγραμμα που δείχνει την στιγμή που τελειώνει η εκκένωση, (c) το MCS πλήττεται γύρω από καλώδιο 50mm κατά τη διάρκεια των δοκιμών (1-μήκος πυρίτιου, 2-ηλεκτρόδια, 3-τοξωτός θάλαμος καταστολής, 4-δίοδος εκκένωσης)

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



2.6.2 Πειραματικά δεδομένα και διαδικασίες δοκιμών

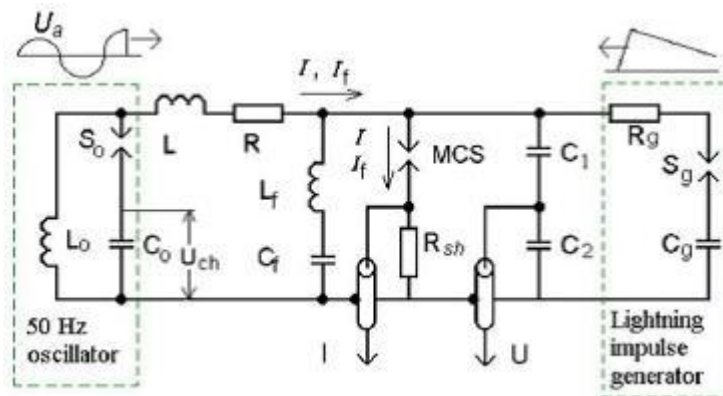
Για τις ανάγκες των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός MCA με διαφορετικά σχήματα ηλεκτροδίων (βλ. Εικόνα 2.6.1.1), συμπεριλαμβανομένων παρακύκλων με διάμετρο 8 mm και πάχος 2mm, κομματιών από ασάλινη ράβδο με μήκος 10mm και διάμετρο 2, 3 και 4 mm και σφαιρών με διάμετρο 10mm. Τα ενδιάμεσα ηλεκτρόδια διατάχθηκαν σε απόσταση 0,5 και 2mm το ένα από το άλλο. Επίσης, η διάμετρος των ανοιγμάτων των θαλάμων ήταν από 2 έως 5 mm, ενώ οι θάλαμοι είχαν βάθος από 1 έως 5 mm. Τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν από το MCA, το οποίο είχε ενδιάμεσα ηλεκτρόδια σε σχήμα σφαίρας. Για αυτό το λόγο, παρακάτω εστιάζουμε στα ευρήματα που προέκυψαν από το εν λόγω σχέδιο MCA.

Προκειμένου να καθοριστεί η επακόλουθη αποδοτικότητα του MCA, όσον αφορά στον τερματισμό του ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε μια δοκιμαστική εγκατάσταση με έναν ταλαντωτή 50 Hz και μια γεννήτρια διέγερσης υψηλής τάσεως κεραυνών. Το διάγραμμα της εγκατάστασης απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6.2.1.

Εικόνα 2.6.2.1. Διάγραμμα με τα κυκλώματα της εγκατάστασης δοκιμής, όπου:

$C_o = 700 \mu\text{F}$; $L_o = 14 \text{ mH}$; $L = 2.7 \text{ mH}$; $R = 0 \dots 10 \text{ Ohm}$;
 $L_f = 0.2 \text{ mH}$; $C_f = 50 \text{ nF}$; $R_{sh} = 0.01 \text{ Ohm}$; $C_1 = 1000 \text{ pF}$;
 $C_2 = 1000 \text{ nF}$ ($C_2/C_1 = 1000$), $R_g = 0 \dots 200 \text{ Ohm}$, $C_g = 0.5 \mu\text{F}$.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Για να διεξαχθεί η δοκιμή του MCS, μια γεννήτρια παραγωγής διέγερσης συνδέθηκε στον απαγωγέα σε σειρά με την αντίσταση R_g . Η εναλλασσόμενη τάση U_a προκλήθηκε από ένα κύκλωμα ταλάντωσης, με συχνότητα ταλάντωσης κοντά στα 50 Hz. Η ενέργεια αποθηκεύτηκε αρχικά σε έναν πυκνωτή (700 μF) C_o με τάση U_{ch} . Η συχνότητα της τάσης εξασφαλίστηκε από το κύκλωμα ταλάντωσης C_o, L_o με την λειτουργία του απαγωγέα S_o , ο οποίος τροφοδοτείται από την υπερτασική διέγερση της γεννήτριας. Το δοκιμαστικό MCS ήταν συνδεδεμένο στον ταλαντωτή κατά μήκος του αντιστάτη

R και του πηνίου L. Το πηνίο L χρησιμοποιήθηκε για να αποσυνδέσει τον πυκνωτή C_0 από το MCS την στιγμή της καταστολής του τόξου σε συχνότητες ανάκτησης της τάσεως ενώ η αντίσταση R_g προσομοίωσε την αντίσταση στο ανασταλτικό κύκλωμα της γραμμής.

Οι δοκιμές διεξήχθησαν για δυο τιμές, για $R_g=0$ και 10 Ohm. Η τιμή $R_g=0$ αντιστοιχεί στην περίπτωση άμεσου πλήγματος κεραυνού στην εναέρια γραμμή (Εικόνα 2.7.1.5), ενώ η τιμή $R_g=10$ αντιστοιχεί σε έμμεσο πλήγμα κεραυνού, δηλαδή σε επαγόμενες υπερτάσεις και διάσπαση των αναστολέων που είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικούς πυλώνες και σε διαφορετικές φάσεις σε μια εναέρια γραμμή μέσης τάσεως (π.χ. 10 kV).

Η συχνότητα επαναφοράς της τάσης τέθηκε στα 50kHz για μια εμπέδηση 60 Ohm του κυκλώματος (MCS, C_f , L_f). Το ρεύμα και η τάση MCS μετρήθηκαν και καταγράφηκαν με την βοήθεια του διαχωριστή χωρητικής τάσης (C_1 , C_2), της αντίστασης διακλάδωσης R_{sh} , των συνδετικών καλωδίων και ενός παλμογράφου με ψηφιακή μνήμη.

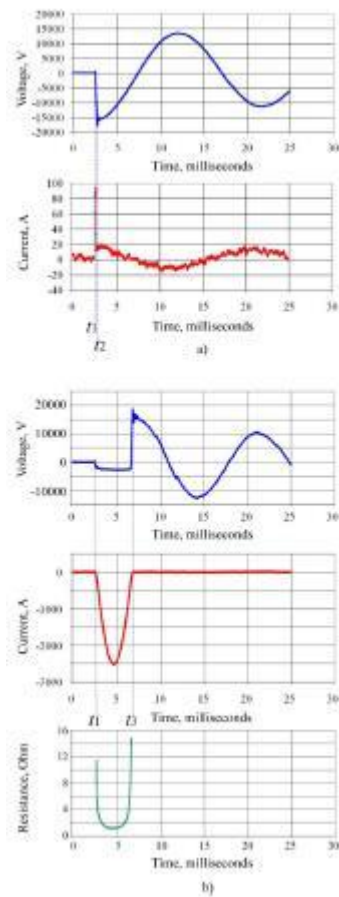
Η δοκιμαστική διαδικασία είχε ως ακολούθως: αρχικά φορτίστηκαν ο πυκνωτής C_0 και η γεννήτρια διέγερσης. Η λειτουργία της γεννήτριας διέγερσης οδήγησε στην βλάβη του δοκιμαστικού MCS και της εφεδρικής αντίστασης S_0 κι έτσι η υπερτασική διέγερση και η τάση AC εφαρμόστηκαν στο δοκιμαστικό MCS ταυτόχρονα. Τέλος, με την απόσβεση της υπερτασικής διέγερσης, στην αντίσταση παρέμεινε μόνο η τάση της ενεργειακής συχνότητας.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφηκαν ταλαντώσεις ρεύματος και τάσης της μορφής που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6.2.2, όπου στο σκέλος (b) παρουσιάζονται επιπλέον διαγράμματα από τον παλμογράφο της

αντίστασης του τόξου R_{dyn} , όπως αυτά προέκυψαν από τον χωρισμό του διαγράμματος της τάσης U από το διάγραμμα του ρεύματος I .

Εικόνα 2.6.2.2. Διαγράμματα ρεύματος, τάσης και αντίστασης.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



Η πιο συχνή δοκιμαστική διαδικασία είχε ως ακολούθως:

Πρώτα, ο πυκνωτής C_0 φορτίστηκε σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο U_{ch} που αντιστοιχούσε στην τιμή της τάσεως του δικτύου. Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σε όλη την δοκιμή και τα διαγράμματα της τάσεως και του ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την καταγραφή των

αποτελεσμάτων της καταστολής ή της μη καταστολής. Στην περίπτωση καταστολής, η τάση U_{ch} αυξήθηκε στο επόμενο βήμα (γενικά 1kV) και η δοκιμή συνεχίστηκε έως το στάδιο μη καταστολής. Επίσης, μετά την μη καταστολή, η τάση U_{ch} μειώθηκε κατά μισή βαθμίδα (γενικά 0,5 kV) και η δοκιμή επαναλήφθηκε. Η μεγαλύτερη τιμή U_{ch} θεωρήθηκε ως η τελική τιμή καταστολής της τάσεως του δικτύου, ενώ η αντίστοιχη τάση της φάσης του δικτύου βρέθηκε από την εξίσωση $U_{quench}=U_{ch}/2$.

Οι διάφορες μελέτες έχουν δείξει πως η καταστολή εκκένωσης σπινθήρων του ηλεκτρικού τόξου λαμβάνουν χώρα σε δυο περιπτώσεις: 1) όταν η στιγμιαία τιμή της υπερτασικής διέγερσης κεραυνών πέφτει σε ένα επίπεδο ίσο με ή μεγαλύτερο από την στιγμιαία τιμή της συχνότητας της τάσης. Δηλαδή, το ρεύμα από την υπέρταση του κεραυνών εξολοθρεύεται χωρίς επακόλουθο ρεύμα στο πλέγμα (αυτό το είδος καταστολής της εκκένωσης αναφέρεται παρακάτω ως διεγερτική καταστολή, βλ. Εικόνα 2.6.2.2(a)) και 2) όταν το επακόλουθο ρεύμα 50 Hz καταλήγει μηδέν (αυτό το είδος καταστολής της εκκένωσης αναφέρεται παρακάτω ως μηδενική καταστολή, βλ. Εικόνα 2.6.2.2(b)). Από τις δοκιμές αποδείχθηκε πως η καταστολή σε χαμηλές τιμές του U_{ch} είναι «σε διέγερση», ενώ καθώς αυξάνεται το U_{ch} τείνει να είναι «σε μηδέν».

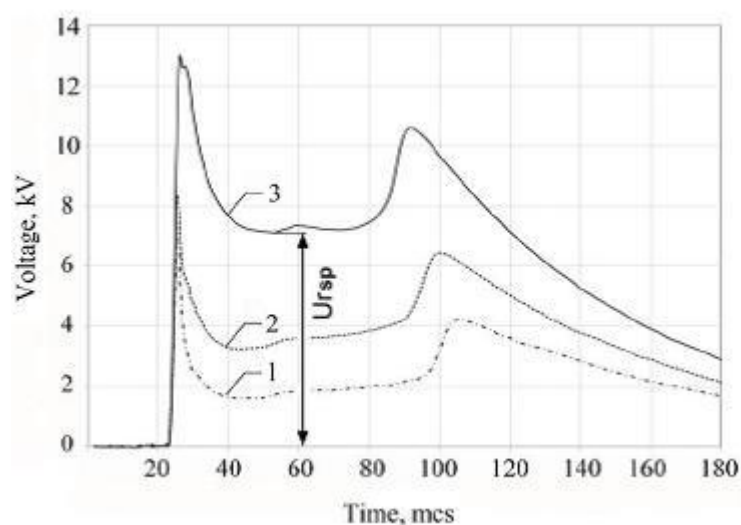
2.6.3 Αποτελέσματα δοκιμών

Ενδιαφέρον έχει το γεγονός πως στην διεγερτική καταστολή (Εικόνα 2.6.2.2(a)) αλλά και στην μηδενική καταστολή (Εικόνα 2.6.2.2(b)) η τάση δεν κόβεται στο μηδέν, όπως γίνεται στο κανονικό πεδίο ράβδου, αλλά εξακολουθεί να υφίσταται μια αξιοσημείωτη υπολειπόμενη ποσότητα τάσης. Στην μηδενική καταστολή, αυτή η υπολειπόμενη τάση είναι μια πτώση τάσεως στην δίοδο του τόξου $U_{r.arc}$ ενώ στην διεγερτική καταστολή είναι μια πτώση τάσεως στην δίοδο εκκένωσης του ηλεκτρικού σπινθήρα $U_{r.sp}$.

Στην Εικόνα 2.6.3.1 απεικονίζονται σχέδια MCS για διάφορους αριθμούς ηλεκτροδίων, ενώ η Εικόνα 2.6.3.2 απεικονίζει την ελάχιστη υπολειπόμενη τάση στον απαγεωγέα συναρτήσε του αριθμού των ηλεκτροδίων m για θετική και αρνητική πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης διέγερσης.

Εικόνα 2.6.3.1. Σχέδια από τον παλμογράφο για MCS με διαφορετικό αριθμό ηλεκτροδίων m , 1-50, 2-100, 3-200.

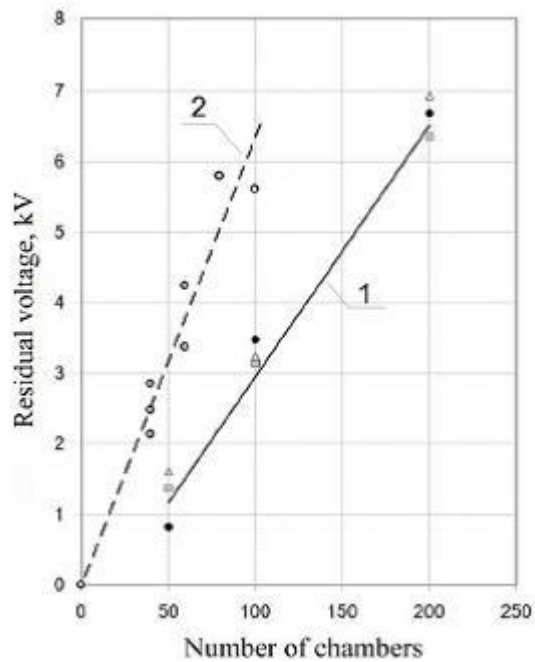
(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Οι δοκιμές έγιναν για τρεις τιμές αντίστασης της συνδεδεμένης γεννήτριας ($R_g=100, 200$ και 70 Ohm). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6.3.2 η υπολειπόμενη τάση U_{rsp} αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του αριθμού θαλάμων MCS και επί της ουσίας δεν εξαρτάται από το R_g . Με άλλα λόγια, το U_{rsp} δεν εξαρτάται από την τάση διέγερσης σε ένα εύρος από 0,4 έως 3 kA.

Εικόνα 2.6.3.2. Η ελάχιστη υπολειπόμενη τάση συναρτήσε του αριθμού ηλεκτροδίων MCS

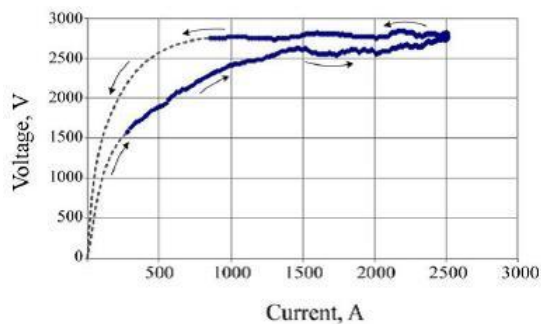
(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Η Εικόνα 2.6.3.3 απεικονίζει την χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του MCS για $m=40$, σύμφωνα με την Εικόνα 2.6.2.2.(b). Από την μελέτη του διαγράμματος φαίνεται πως δεν είναι γραμμικό και η πτώση τάσης του τόξου είναι μάλλον υψηλή. Επίσης, ενώ το ρεύμα ποικίλλει από 1000 A έως 2500 A, η υπολειπόμενη τάση παραμένει σταθερή στα 2,6 kV.

Εικόνα 2.6.3.3. Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του MCS για $m=40$, σύμφωνα με την Εικόνα 2.6.2.2.(b).

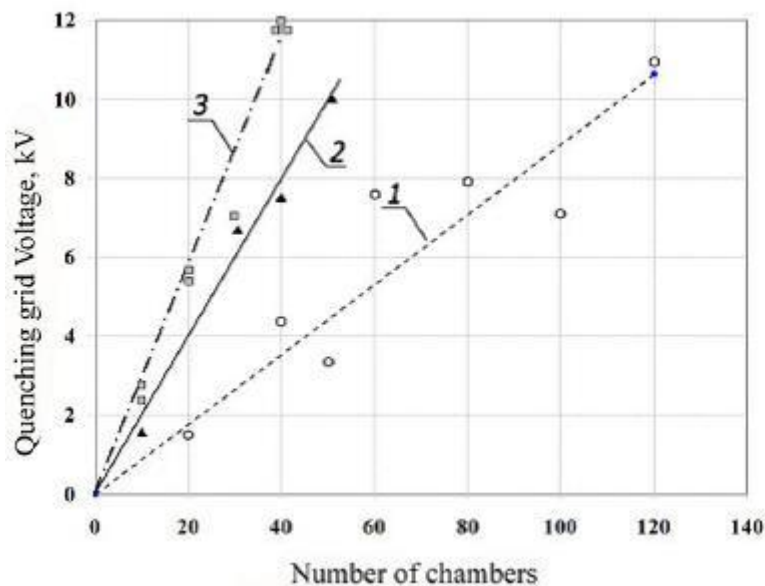
(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



Η Εικόνα 2.6.3.4 απεικονίζει πειραματικές τιμές της τάσεως του δικτύου, στις οποίες το επακόλουθο ρεύμα καταστέλλεται σε συνάρτηση του αριθμού θαλάμων MCS.

Εικόνα 2.6.3.4. Η τάση του δικτύου στην καταστολή επακόλουθου ρεύματος σε συνάρτηση του αριθμού θαλάμων MCS.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Τα δεδομένα της Εικόνας 2.6.3.4 καθιστούν δυνατή την εκτίμηση των απαραίτητων αριθμών διόδων MCS για απαγωγείς διαφορετικών τάσεων.

Τα MCS υποβλήθηκαν σε δοκιμές ηλεκτροδυναμικής σταθερότητας χρησιμοποιώντας 4/10 mcs 65 και 100 kA (max). Τα πρωτότυπα MCS άντεξαν σε πέντε εκθέσεις διέγερσης ρεύματος των 65kA ή σε δύο εκθέσεις διέγερσης των 100 kA, κάτι που αποδεικνύει πως τα MCS μπορούν να αντέξουν σε ηλεκτροδυναμική σύγκρουση με τις άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις.

2.7 Απαγωγείς «πολυθαλάμων» (Multi-chamber arresters – MCA)

2.7.1 MCA 10-20 kV

Τα βασικά κομμάτια ενός MCA 10-20kV (βλ. Εικόνες 2.7.1.1 και 2.7.1.2) είναι ένα MCS, μια ράβδος υαλονήματος και μια κατασκευή για την ασφάλιση των απαγωγέων στους μονωτήρες. Οι απαγωγείς αναρτώνται στους μονωτήρες, με κενά αέρος 3 με 6 cm ανάμεσα στις κορυφές των απαγωγέων και του αγωγού. Μια κεραυνική υπέρταση πρώτα εξουδετερώνει τον σπινθήρα του διάκενου και μετά το MCS του απαγωγέα, διασφαλίζοντας την εξουδετέρωση του επακόλουθου ρεύματος όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.6.

Εικόνα 2.7.1.1. 10kV απαγωγέας «πολυθαλάμων» MCA-10-I για προστασία από επαγόμενες υπερτάσεις.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Εικόνα 2.7.1.2. Απαγωγέας «πολυθαλάμων» για την προστασία των γραμμών 10 kV από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις και για την προστασία από την επαγόμενη υπέρταση των 20 kV.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



Στην Εικόνα 2.7.1.1 φαίνεται ένας απαγωγέας, με 20 θαλάμους εκκένωσης αερίων που έχουν σκοπό την προστασία των εναέριων γραμμών 10kV (12kV max) από επαγόμενες υπερτάσεις. Ένα κομμάτι αυτού του μοντέλου εγκαθίσταται σε κάθε πυλώνα (Εικόνα 2.7.1.3) και σε αυτήν την περίπτωση, η διαδρομή του επακόλουθου ρεύματος AC, που συνδέεται με την επαγόμενη υπέρταση κεραυνών, συμπεριλαμβάνει τα κυκλώματα γείωσης του πυλώνα. Χάρη σε μια επιπλέον αντίσταση του κυκλώματος γείωσης του πυλώνα, το επακόλουθο ρεύμα μειώνεται, κάτι που αυξάνει την αποδοτικότητα της καταστολής του απαγωγέα.

Εικόνα 2.7.1.3. Απαγωγέας «πολυθαλάμων» για την προστασία των γραμμών 20kV από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις (MCA-20-DLS).

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Στον Πίνακα 2.7.1.1 παρατίθενται στοιχεία σχετικά με την αποδοτικότητα του απαγωγέα.

Πίνακας 2.7.1.1. Στοιχεία αποδοτικότητας απαγωγέα.

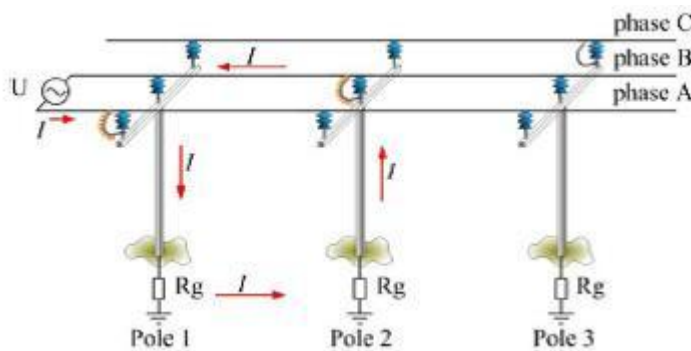
(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)

Voltage rating, kV	10	10-20	20	35
Arrester type: MCA-	10-I*	10-DLS**, 20-I	20-DLS	35-DLS
Number of arc-quenching chambers	20	40	120	300
Maximum 50% impulse flashover voltage, kV:				
Positive polarity	70	85	90	150
Negative polarity	70	85	85	120
Minimum withstand power frequency voltage, kV:				
Dry	42	65	65	95
Wet	28	50	50	70
Minimum magnitude of 4/10 μs impulse current, kA withstood at: two applications	100	100	100	100
five applications	65	65	65	65
Weight, kg	0.4	0.6	2.0	6
Minimum service life, years	30	30	30	30

Στην Εικόνα 2.7.1.2 απεικονίζεται ένας απαγωγέας με 40 θαλάμους εκκένωσης αερίων (βλέπε Πίνακα 2.7.1.1), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εναέριες γραμμές των 10 kV για προστασία από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις και σε γραμμές των 20 kV για να καταπολεμηθούν οι επαγόμενες υπερτάσεις. Στην δεύτερη περίπτωση, η παραπάνω διαδικασία των 10 kV, με έναν αγωγό εγκατεστημένο σε κάθε πυλώνα, έχει αποδειχθεί ιδιαίτερως πρακτική (Εικόνα 2.7.1.4).

Εικόνα 2.7.1.4. Η διάταξη των απαγωγέων για την προστασία από τις επαγόμενες υπερτάσεις.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



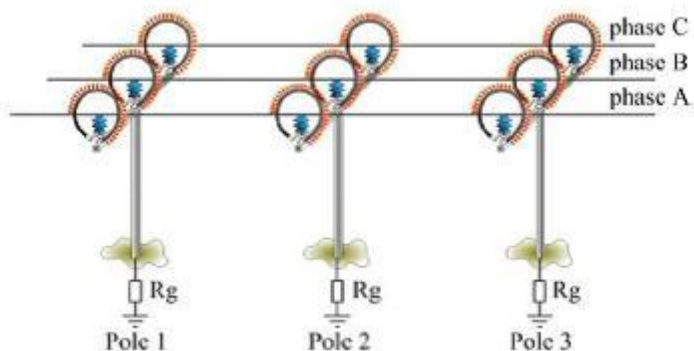
Ένα άμεσο πλήγμα κεραυνού σε μια γραμμή μέσης τάσης των 10-20kV προκαλεί διάσπαση των μονωτήρων σε έναν ή πολλούς πυλώνες. Για να εγguηθούν μια αξιόπιστη προστασία από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις, οι απαγωγείς θα πρέπει να εγκατασταθούν παράλληλα σε κάθε μονωτήρα της γραμμής (ή στα τμήματα των γραμμών που πρέπει να προστατευθούν από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις, βλ. Εικόνα 2.7.1.5).

Περίπου 1800 απαγωγείς αυτού του είδους (Εικόνα 2.7.1.5) εγκαταστάθηκαν σε εναέριες γραμμές διανομής 6kV στην εταιρεία πετρελαίου "Lukoil" (Ρωσία) τον Μάρτιο του 2010.

Η Εικόνα 2.7.1.3 δείχνει έναν απαγωγέα με 120 θαλάμους εκκένωσης σχεδιασμένους για την προστασία των γραμμών 20kV από άμεσες κεραυνικές προσπτώσεις (βλ. Πίνακα 2.7.1.1). Η λειτουργία του και η διαδικασία εγκατάστασης είναι παρόμοια με αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω. (βλ. Εικόνα 2.7.1.5).

Εικόνα 2.7.1.5. Η διάταξη των απαγωγέων για προστασία από άμεσα πλήγματα κεραυνών.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



2.7.2 MCA – 35 kV

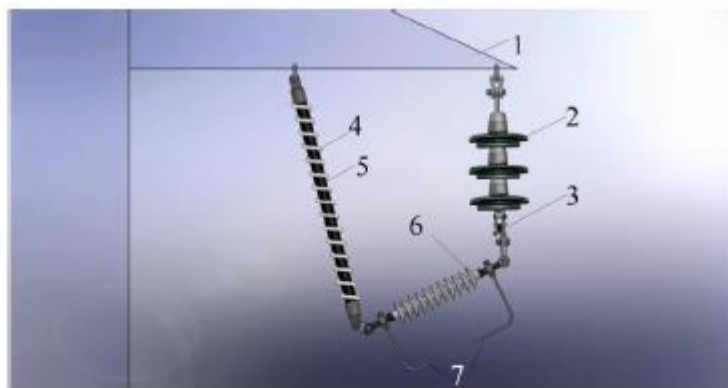
Αυτό το MCA αποτελείται από ένα MCS, μια βάση στήριξης και έναν πολυσύνθετο μονωτήρα με ράβδους εκκένωσης (βλ. Εικόνα 2.7.2.1). Η βάση στήριξης είναι ένα κομμάτι από καλώδιο, καλυμμένο με πολυαιθυλένιο, με έναν πυρήνα από υαλόνημα και με μεταλλικούς ακροδέκτες. Η εξωτερική διάμετρος του καλωδίου είναι 50mm, ενώ το κάλυμμα του καλωδίου αποτελείται από ένα παχύ εσωτερικό στρώμα από μονωτικό πολυαιθυλένιο και από μια εξωτερική στρώση από φωτοσταθερό και ανθεκτικό πολυαιθυλένιο διαμέτρου 2mm. Η ράβδος από υαλόνημα και πλαστικό με διάμετρο 8 mm τοποθετείται στους ακροδέκτες. Ο σχεδιασμός διασφαλίζει την

υψηλή μηχανική αντοχή του απαγωγέα και το MCS τοποθετείται σε ελικοειδές σχήμα γύρω από την βάση στήριξης.

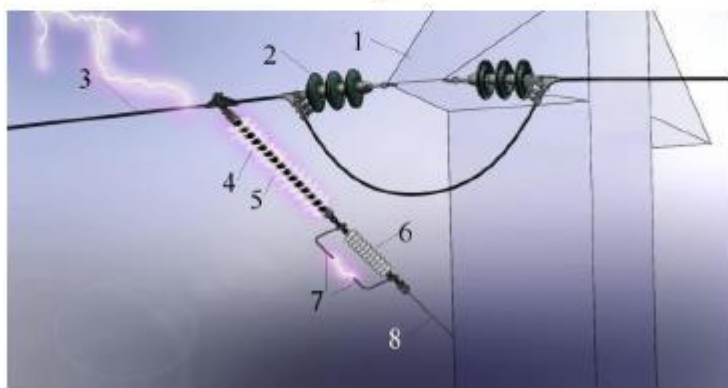
Εικόνα 2.7.2.1. Απεικόνιση ενός MCA-35kV.

1-πυλώνας, 2-μονωτής, 3-γραμμή αγωγού, 4-MCS, 5-βάση στήριξης, 6-πολυσύνθετος μονωτής, 7-ράβδος εκκένωσης, 8-αγωγός γείωσης του απαγωγέα.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



a)



b)

Όταν προκληθεί μια υπέρταση στην γραμμή του αγωγού από μια άμεση κεραυνική πρόσπτωση (βλ. Εικόνα 2.7.2.1), πρώτα πυροδοτείται το διάκενο ηλεκτρικού σπινθήρα ανάμεσα στις ράβδους εκκένωσης στον πολυσύνθετο μονωτήρα και μετά το MCS. Το ρεύμα υπέρτασης των κεραυνών διαρρέει τον

αγωγό γείωσης του απαγωγέα και καταλήγει στο έδαφος. Τα άριστα χαρακτηριστικά εκκένωσης-καταστολής των MCS εγγυώνται είτε μηδενική τιμή ή εξόντωση του ρεύματος υπέρτασης και η γραμμή μεταφοράς συνεχίζει να λειτουργεί χωρίς βλάβη. Τα δεδομένα απόδοσης των 35kV MCS φαίνονται στον Πίνακα 2.7.1.1. Η Εικόνα 2.8.6 δείχνει μια εμπορική εναέρια γραμμής 35 kV του δικτύου Kamyshin Grid of Volgogradenergo Utility (Ρωσία) με δυο MCS εγκατεστημένα στις εξωτερικές φάσεις.

2.8 Απαγωγείς «πολυθαλάμων» μονωτήρων (Multi-chamber insulator arresters –MCIA

Η Εικόνα 2.8.1 δείχνει φωτογραφίες ενός MCIA που βασίζεται σε έναν μονωτήρα με ράβδους από πορσελάνη που χρησιμοποιείται ευρέως σε εναέρια σιδηροδρομικά συστήματα επικοινωνίας. Το MCS βρίσκεται στα τρία τέταρτα της περιμέτρου της μόνωσης. Τα αριστερά και δεξιά άκρα του MCS προσεγγίζονται από τις άνω και κάτω τροφοδοσίες των ηλεκτροδίων, αντιστοίχως, οι οποίες είναι εγκατεστημένες στους άνω και κάτω ακροδέκτες, ενώ ανάμεσα στα τροφοδοτούμενα ηλεκτρόδια και στις άκρες των MCS υπάρχουν διάκενα ηλεκτρικών σπινθήρων.

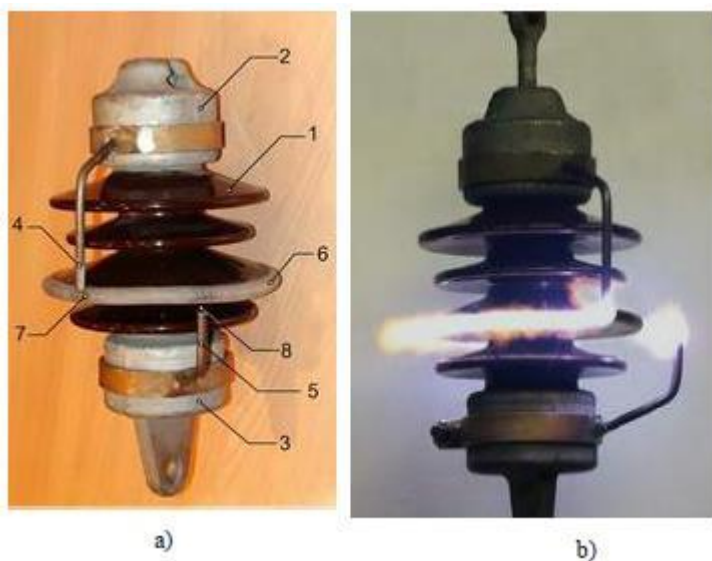
Όταν το MCIA επιβαρύνεται από μια υπέρταση, πρώτα σπινθηρίζουν τα διάκενα αέρος και μετά το MCS. Το ρεύμα της υπέρτασης του κεραυνών ρέει από τον χαμηλότερο ακροδέκτη και το ηλεκτρόδιο τροφοδοσίας του διαμέσου της διόδου του χαμηλότερου διάκενου του ηλεκτρικού σπινθήρα προς το MCS. Κατόπιν συνεχίζει στον άνω ακροδέκτη διαμέσου της διόδου εκκένωσης του άνω διάκενου του ηλεκτρικού σπινθήρα και του άνω ηλεκτροδίου τροφοδοσίας. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν παρεμβαίνοντα ηλεκτρόδια ανάμεσα στα άνω και κάτω ηλεκτρόδια τροφοδοσίας. Συνεπώς, η εκκένωση αναπτύσσεται στο MCS χρησιμοποιώντας περίπου τα τρία τέταρτα της περιφέρειας του πορσελάνινου «υποστέγου».

Εικόνα 2.8.1. ΜCΙΑ με μονωτήρα από πορσελάνη που χρησιμοποιείται σε εναέρια σιδηροδρομικά συστήματα επικοινωνίας των 3kV DC.

(a)φωτογραφία ΜCΙΑ, (b)δοκιμές ΜCΙΑ

1-μονωτικό σώμα, 2-άνω ακροδέκτης, 3-κάτω ακροδέκτης, 4-άνω ηλεκτρόδιο τροφοδοσίας, 5-κάτω ηλεκτρόδιο, τροφοδοσίας, 6-MCS, 7-άνω διάκενο ηλεκτρικού σπινθήρα, 8-κάτω διάκενο ηλεκτρικού σπινθήρα

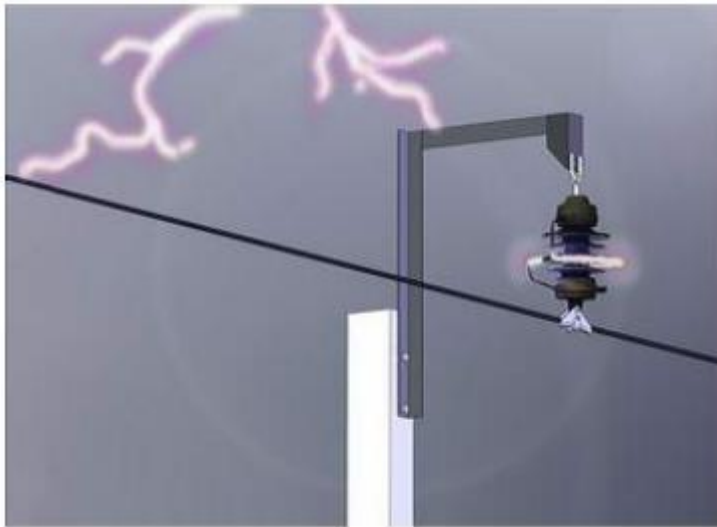
(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Η Εικόνα 2.8.2 δείχνει σχηματικά ένα ΜCΙΑ για την υποστήριξη ενός συστήματος επικοινωνίας.

Εικόνα 2.8.2. Απεικόνιση της προστασίας του συστήματος επικοινωνίας DC με την βοήθεια του ΜCΙΑ.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Ένα άμεσο πλήγμα κεραυνού στο σύστημα επικοινωνίας έχει ως αποτέλεσμα έναν σπινθηρισμό. Όταν έχει ολοκληρωθεί η υπέρταση του κεραυνού, το ρεύμα του κατευθύνεται στο έδαφος με την βοήθεια του MCS και εκεί γίνεται μια σβέση της εκκένωσης χωρίς κάποια επακόλουθη τάση, οπότε το σύστημα επικοινωνίας συνεχίζει να λειτουργεί χωρίς διακοπή.

Η Εικόνα 2.8.3 δείχνει ένα MCIA βασισμένο σε ένα μονωτήρα τύπου SDI-37. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με το MCIA που φαίνεται στην Εικόνα 2.9.1 αλλά προορίζεται για την προστασία των γραμμών 6-10 kV από άμεσες προσπτώσεις κεραυνών και των γραμμών 20kV από τις επαγόμενες υπερτάσεις.

Επίσης, η Εικόνα 2.8.4 δείχνει ένα MCIA βασισμένο σε μονωτήρα τύπου U120AD (MCIA-U120AD), κατά την διάρκεια δοκιμών εκτόνωσης του επακόλουθου ρεύματος με μηδενική καταστολή.

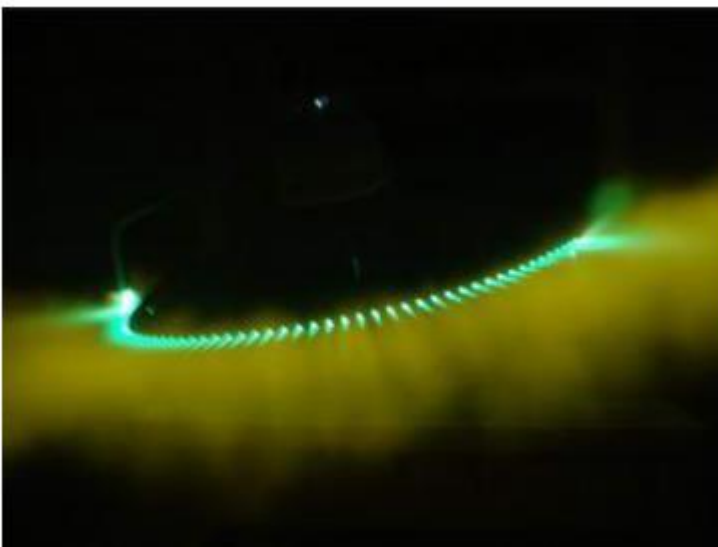
Εικόνα 2.8.3. ΜCΙΑ 20kV βασισμένο σε μονωτήρα SDI-37.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



Εικόνα 2.8.4. ΜCΙΑ με μονωτήρα U120AD κατά την διάρκεια δοκιμών καταστολής του επακόλουθου ρεύματος.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)

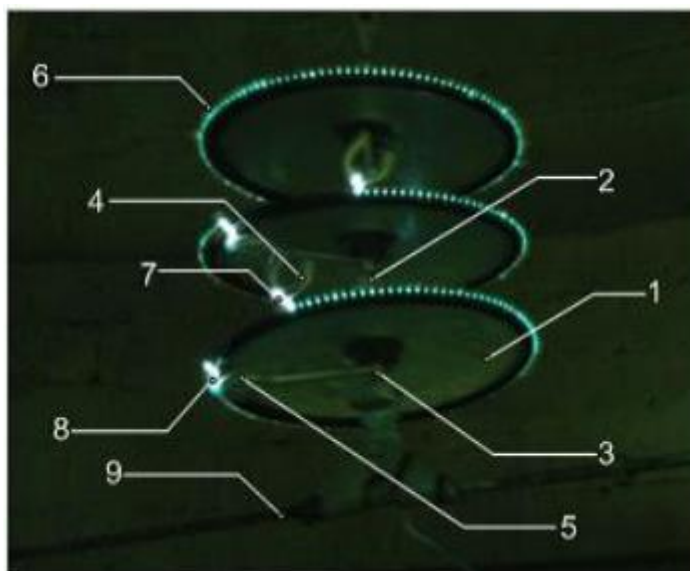


Περαιτέρω, η Εικόνα 2.9.5 δείχνει μια φωτογραφία από ένα σύρμα MCIΑ κατά την διάρκεια δοκιμών κεραυνικών διεγέρσεων. Με την εφαρμογή μιας υπέρτασης στον αγωγό καθώς και στο κάτω ηλεκτρόδιο τροφοδοσίας που βρίσκεται πιο κοντά στον αγωγό, το κάτω διάκενο εκκένωσης του ηλεκτρικού σπινθήρα εξουδετερώνεται και προκύπτει να εφαρμόζεται τάση στο MCS (η αριστερή πλευρά του είναι στην Εικόνα 2.9.5). Το MCS ενεργοποιείται, γίνεται υπερπήδηση του ηλεκτρικού σπινθήρα στο άνω διάκενο αέρος, ανάμεσα στην δεξιά άκρη του MCS και στο άνω τροφοδοτούμενο ηλεκτρόδιο, οπότε τροφοδοτείται τάση στον δεύτερο μονωτήρα και με τον τρόπο αυτόν συνεχίζει η όλη διαδικασία.

Εικόνα 2.8.5. Φωτογραφία από ένα σύρμα MCIΑ κατά την διάρκεια δοκιμών κεραυνικής διέγερσης.

1-μονωτικό σώμα, 2-τάπα, 3-κορύνη, 4-άνω ηλεκτρόδιο τροφοδοσίας, 5-κάτω ηλεκτρόδιο τροφοδοσίας, 6-MCS, 7-άνω διάκενο ηλεκτρικού σπινθήρα, 8-κάτω διάκενο ηλεκτρικού σπινθήρα, 9- αγωγός.

(Πηγή: Podporokin *et al* 2010)



Αφού έχουν ενεργοποιηθεί όλα τα σύρματα MCIA, το ρεύμα υπέρτασης του κεραυνού ρέει διαμέσου του πυλώνα στο έδαφος. Το τόξο εξολοθρεύεται και η γραμμή συνεχίζει να λειτουργεί χωρίς διακοπή ρευματοδότησης. Τον Μάρτιο του 2009 ένα σύνολο από 300 MCIA-35kV εγκαταστάθηκαν για πρωτότυπη λειτουργία στο δίκτυο Kamyshin Grid Area of Volgogradenergo Utility (Εικόνα 2.8.6).

Εικόνα 2.8.6. Μια εμπορική εναέρια γραμμή 35 kV (Kamyshin Grid Volgogradenergo Utility) με MCS στις εξωτερικές φάσεις και με MCIA στην κεντρική φάση.

(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)



Η εταιρεία Federal Grid, η οποία είναι μοναδική ιδιοκτήτρια όλων των εναέριων γραμμών 220 kV και πάνω από την Ρωσία, ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για την τεχνολογία MCIA και στο πλαίσιο αυτό προώθησε την έρευνα και ανάπτυξη (R&D) όσον αφορά στις γραμμές 220kV. Ο Πίνακας 2.8.1 περιλαμβάνει μια σειρά από δοκιμές που έγιναν σε σύρματα με 14 MCIA-220. Σημειώνεται ότι τα MCIA-220 πέρασαν επιτυχώς όλες τις δοκιμές που καταγράφονται στον Πίνακα 2.7.1.1.

Πίνακας 2.8.1. Δοκιμές σε σύρματα με 14 MCIA-220.(Πηγή: Podporkin *et al* 2010)

TABLE II.

№	TESTS OF 220 kV MULTI CHAMBER INSULATOR-ARRESTER STRINGS (MCIAS-220).
1.	Flashover characteristics at lightning and switching impulses
2.	Flashover characteristics at operational voltage at clean, wet and polluted conditions.
3.	Flashover characteristics at operational voltage and ice.
4.	Power follow current quenching
5.	Electrodynamic and thermal stability at application of lightning impulses and power follow current quenching.
6.	Radio interference.
7.	Climatic tests.
8.	Mechanical tests.

2.9 Η επίδραση της αποτροπής θετικής επαγόμενης τάσης σε εναέριους αγωγούς από άμεσα πλήγματα κεραυνών

Είναι ευρέως γνωστό πως οι αρνητικές νεφελώδεις φορτίσεις πριν από την κάθοδο ενός βηματικού οδηγού (κεραυνού - leader) προκαλούν θετικές φορτίσεις σε γειωμένες αγωγίμες κατασκευές και οδηγούν στην όξυνση των ηλεκτρικών πεδίων στην κορυφή της κατασκευής καθώς και σε πιθανό σχηματισμό θετικών εκκενώσεων (Golde 1973). Αυτή η επίδραση γίνεται πιο έκδηλη σε περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων και σε υψηλότερες γειωμένες αγωγίμες κατασκευές, δηλαδή όσο υψηλότερο είναι το χωρικό δυναμικό στην κορυφή της αγωγίμης κατασκευής τόσο πιο έκδηλη είναι η επίδραση. Οι προαναφερθείσες αγωγίμες κατασκευές

περιλαμβάνουν ιστούς, κτίρια, καλώδια γείωσης, χαμηλούς αγωγούς κ.λπ. Για μια κατασκευή δεδομένου ύψους, καθώς το περιβάλλον εδαφικό πεδίο οξύνεται, μπορεί να σχηματιστεί ένα κρίσιμο χωρικό δυναμικό, ενεργοποιώντας έναν ανοδικό οδηγό, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια χαμηλότερη κλίση τάσεως, η οποία με την σειρά της μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα και η διάρκεια του οδηγού (Les Renardieres Group 1972, Les Renardieres Group 1974, Rizk 1989). Με τάσεις που μπορούν να είναι έως μερικά kV/m, ο ανοδικός οδηγός μπορεί να καλύψει μεγάλες αποστάσεις χωρίς υπερβολική ζήτηση χωρικού δυναμικού, όπως θα χρειαζόταν για τις θετικές επαγόμενες τάσεις (streamers) οι οποίες έχουν κατώτερη τάση, κατά προσέγγιση, τα 400 kV/m. Σε υψηλές κατασκευές σε περιβάλλοντα πεδία μπορούν να διαμορφωθούν θετικοί ανοδικοί οδηγοί εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων, χωρίς την εμφάνιση ενός κοντινού καθοδικού οδηγού, έχοντας ως επίπτωση μια ανοδική ακαριαία λάμψη (εκκένωση) (Rakov & Uman 2003). Για γειωμένες κατασκευές μετρίου ύψους (της τάξης των δεκάδων μέτρων), όμως, μπορούν να δημιουργηθούν κρίσιμες συνθήκες για τον σχηματισμό συνεχόμενων ανοδικών οδηγών μόνο με την παρουσία ενός καθοδικού οδηγού. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ανοδικός οδηγός μπορεί να καθοδηγηθεί για να συναντηθεί με τον καθοδικό οδηγό σε ένα αποκαλούμενο τελικό άλμα (final jump) που οδηγεί σε μια καθοδική ακαριαία εκκένωση (Rizk 1990).

Είναι γνωστό πως οι γειωμένες κατασκευές ενός δεδομένου ύψους συλλέγουν καθοδικούς οδηγούς εντός μιας ζώνης που εξαρτάται από την φόρτιση του καθοδικού οδηγού και η οποία για εναέριους αγωγούς μπορεί να χαρακτηριστεί από μια αποκαλούμενη μέγιστη ελκτική απόσταση (Rizk 1990). Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως από αυτήν την απλοποιημένη εικόνα πως όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από τον ανοδικό θετικό οδηγό, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη απόσταση της κατασκευής. Εναλλακτικώς, εάν το μήκος του ανοδικού θετικού οδηγού μπορούσε να μειωθεί ή ακόμη και να

εξάλειφθεί τελείως, αυτό θα είχε την επιθυμητή μείωση της απόστασης του γειωμένου αγωγού. Θα πρέπει να σημειωθεί, όμως, πως ακόμη και η πλήρης εξάλειψη του ανοδικού συνδετικού οδηγού δεν θα εξάλειφε τελείως τις καθοδικές ακαριαίες λάμπεις, αφού η γειωμένη κατασκευή θα μπορούσε να πληγεί από αρνητικές επαγόμενες τάσεις, οι οποίες είναι πάντα παρούσες πριν από έναν επικείμενο αρνητικό καθοδικό οδηγό.

Υπάρχουν άφθονες επιστημονικές και θεωρητικές αποδείξεις (Les Renardieres Group 1972, Les Renardieres Group 1974, Rizk 1989, Rizk 1990) ότι η παρουσία θετικής επαγόμενης τάσης, κρίσιμου μεγέθους, αποτελεί την προϋπόθεση για τον συνεχόμενο σχηματισμό θετικού οδηγού. Θα μπορούσαμε, λοιπόν, να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα πως η αποτροπή επαγόμενης τάσης θα έπρεπε οπωσδήποτε να έχει μια θετική επίδραση, η οποία θα εμποδίζει τον σχηματισμό θετικών οδηγών. Όμως, υπάρχουν άφθονες επιστημονικές και θεωρητικές αποδείξεις από έρευνες πάνω σε μεγάλα κενά αέρος (Rizk 1989, Carrara & Thione 1976), οι οποίες δείχνουν, πως για ένα οποιοδήποτε ηλεκτρόδιο, εάν αγνοηθούν οι επιδράσεις φόρτισης του χώρου εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων και εφόσον η εναρκτήρια τάση είναι χαμηλότερη από το αρχικό επίπεδο των κρίσιμων οδηγών, η αύξηση της εναρκτήριας τάσης ή του χωρικού δυναμικού δεν θα έχει σχεδόν καμία επίδραση στην έναρξη του οδηγού.

Συνεπώς, η θετική καταστολή του οδηγού από τον γειωμένο αγωγό μέσα σε συνθήκες καταιγίδας είναι ένα πολύπλοκο ζήτημα το οποίο δεν μπορεί απλά να επιλυθεί με οποιαδήποτε κίνηση η οποία προκαλεί αποτροπή της επαγόμενης τάσης (ιονισμένο πλάσμα - streamer). Στο πλαίσιο αυτό, στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου θα προσδιορίσουμε την επίδραση της απόστασης που υπάρχει ανάμεσα στον ανοδικό συνδετικό οδηγό και στην μέγιστη ελκτική απόσταση των τυπικών εναέριων αγωγών. Επίσης, θα διερευνήσουμε τις δυνατότητες και τους περιορισμούς μερικών

τεχνικών, για την αναστολή δημιουργίας θετικών επαγόμενων τάσεων πάνω στους εν λόγω αγωγούς, με συγκεκριμένη αναφορά στην καταστολή των θετικών επαγόμενων τάσεων από μια υπέρ-ηλεκτρική εκκένωση (ultra-corona) (Rizk 2010a). Κατόπιν θα επιχειρηθεί η αξιολόγηση της επίδρασης της αναστολής δημιουργίας θετικών επαγόμενων τάσεων στο αρχικό επίπεδο του ανοδικού συνδετικού οδηγού και τέλος, η εκτίμηση της επίδρασης της αύξησης (στην μέγιστη ελκτική απόσταση) του χωρικού δυναμικού του θετικού ανοδικού οδηγού και η έκθεση του οδηγού στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα.

2.10 Μοντελοποίηση διαδικασίας κεραυνικών προσπτώσεων

Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της έναρξης θετικών οδηγών (Rizk 1989, Rizk 1990, Rizk 1994) έχουν υποβληθεί σε σύγκριση με εκτεταμένα εργαστηριακά πειράματα πάνω σε μεγάλα κενά αέρος καθώς και σε επιτόπια έρευνα σε χώρους με συχνή κεραυνική δραστηριότητα.

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η διαδικασία ξεκινά αποτελεσματικά όταν οι κρίσιμες συνθήκες του χωρικού δυναμικού του γειωμένου αγωγού συνδυάζονται στην κατεύθυνση δημιουργίας του συνεχούς ανοδικού οδηγού. Για έναν κανονικό αγωγό, χωρίς αναστολέα, με ακτίνα r_0 και ύψος πάνω από το έδαφος h , το μέσο κρίσιμο εδαφικό πεδίο E_{gc0} ισούται με (Rizk 1990):

$$E_{gc0} = \frac{2247}{h + \frac{5.15 - 5.49 \ln r_0}{\ln \frac{2h}{r_0}}} \quad (\text{kV, m})$$

(εξίσωση 2.10.1)

Αυτό ακολουθείται από μια ανοδική τροχιά, η οποία θα καταλήξει είτε σε μια συνάντηση με τον καθοδικό αρνητικό οδηγό σε ένα τελευταίο άλμα, όπου γίνεται μια κατάρρευση του της επαγόμενης τάσης ανάμεσα στις δυο κορυφές των οδηγών, είτε σε έναν ανεκτέλεστο θετικό οδηγό. Στο σκηνικό αυτό, η ταχύτητα του οδηγού στο μοντέλο είναι διαφορετική (Rizk n.d.), αναλόγως των διαστάσεων του χωρικού δυναμικού στην κορυφή του οδηγού και συνεπώς, η αναλογία ανάμεσα στην θετική και αρνητική ταχύτητα του οδηγού ποικίλει.

Από αυτό το είδος ανάλυσης δύναται να εκτιμηθεί ο ρόλος του ανοδικού συνδετικού θετικού οδηγού στην διαδικασία πρόσπτωσης, άρα και η επίπτωση της θετικής καταστολής της επαγόμενης τάσης στην μέγιστη ελκτική απόσταση.

2.11 Μοντελοποίηση της απόδοσης της corona σε αγωγό αποτροπής επαγόμενης τάσης

Έστω ένα γειωμένο καλώδιο ακτίνας r_0 , εγκατεστημένο σε ύψος h πάνω από το έδαφος, που εμβαπτίζεται σε ένα ενιαίο περιβάλλον πεδίο προκαλούμενο από ένα αρνητικά φορτισμένο νέφος, το οποίο αυξάνεται μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή E_{gm} σε μια χρονική διάρκεια t_0 , που αντιστοιχεί στο μέγιστο χωρικό δυναμικό:

$$U_m = E_{gm} \cdot h \quad (\text{εξίσωση 2.11.1})$$

Έστω επίσης πως ο αγωγός βρίσκεται σε μια κατάσταση ultra-corona (Rizk 2010a, Uhlig 1956, Trinh & Jordan 1968), οπότε το πρόβλημα είναι παρόμοιο με εκείνο μιας σφαίρας σε ελεύθερο χώρο (Aleksandrov *et al* 2001, Aleksandrov *et al* 2005). Με βάση το απλοποιημένο μοντέλο που περιγράφει την παραγωγή θερμότητας και τον χρόνο ανάπτυξης της ζώνης θετικών ιόντων στον χώρο γύρω από τον αγωγό έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\rho E) = 0$$

(εξίσωση 2.11.2)

όπου ρ είναι η χωρική πυκνότητα και E το ηλεκτρικό πεδίο σε μια ακτινική απόσταση r .

Η εξίσωση Poisson έχει ως ακολούθως:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(εξίσωση 2.11.3)

Η πρώτη οριακή συνθήκη σχετίζεται με το πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού σε κατάσταση corona (μια ηλεκτρική εκκένωση η οποία συνοδεύεται από τον ιονισμό της γύρω ατμόσφαιρας):

$$E(r_0) = E_{ci} \quad (\text{εξίσωση 2.11.4})$$

Η άλλη οριακή συνθήκη σχετίζεται με το σύνορο της ζώνης της corona για $r=R$:

$$U_{sp}(t) = \int_{r_0}^R E(r) dr + R \cdot E(R) \cdot \ln \frac{2h}{R}$$

(εξίσωση 2.11.5)

όπου το $U_{sp}(t)$ είναι το χωρικό δυναμικό, που ισούται με $E_g(t) \cdot h$ σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t .

Ο τελευταίος όρος στην εξίσωση 2.11.5 αναφέρεται στο δυναμικό $U(R)$ στο όριο της κυλινδρικής ζώνης του ηλεκτρικού φορτίου και υποθέτει πως το ύψος h του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερο από την οριακή ακτίνα της corona $R(t)$. Αν αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται επαρκώς, ο λογάριθμος στην εξίσωση 2.11.5 θα πρέπει να αντικατασταθεί από την σχέση:

$$\ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 - R^2}}{R}\right).$$

Αν σε οποιαδήποτε στιγμή το μοναδιαίο ρεύμα της corona είναι i , η λύση της παραπάνω εξίσωσης έχει ως εξής:

$$E(r) = \sqrt{\frac{r_o^2 E_{ci}^2}{r^2} + \frac{i}{2\pi\epsilon_o\mu} \left[1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right]}$$

(6)

$$\rho(r) = \frac{i}{2\pi\mu r E(r)}$$

(εξισώσεις 2.11.6 και 2.11.7, αντιστοίχως)

Στο όριο του χώρου της ηλεκτρικής φόρτισης (σύνορο), το ηλεκτρικό πεδίο $E_f = E(R)$ κατά προσέγγιση δίδεται από:

$$E_f = \sqrt{\frac{i}{2\pi\epsilon_o\mu}}$$

(εξίσωση 2.11.8)

Το συνολικό φορτίο του χώρου της corona ανά μονάδα μήκους του αγωγού είναι:

$$q(t) = 2\pi\epsilon_0 [R(t) \cdot E_f - r_0 E_{ci}]$$

(εξίσωση 2.11.9)

Για να απλουστευθεί ακόμα περισσότερο η ανάλυση της χρονικής ανάπτυξης του χώρου ηλεκτρικής φόρτισης, θεωρούμε ότι η συνθήκη $r_0 E_{ci} \ll R(t) \cdot E_f$ ικανοποιείται σε τέτοιο βαθμό ώστε η πτώση τάσεως στην ζώνη της corona μπορεί να προσεγγιστεί με την ενσωμάτωση της εξίσωση 2.12.6, οπότε έχουμε:

$$\int_{r_0}^R E(r) dr \cong R \cdot E(R)$$

(εξίσωση 2.11.10)

Η τεκμηρίωση της παραπάνω προσέγγισης μπορεί να πραγματοποιηθεί με σύγκριση των αποτελεσμάτων της απλουστευμένης αναλυτικής λύσης, με μια αριθμητική λύση βάσει των εξισώσεων 2.11.2 και 2.11.3 με χρήση των οριακών συνθηκών 2.11.14 και 2.11.5.

Από τις εξισώσεις 2.11.5 και 2.11.10 μπορεί να διατυπωθεί μια προσεγγιστική σχέση ανάμεσα στο $U_{sp}(t)$ και $U(R)$:

$$U(R) = U_{sp}(t) \cdot \frac{\ln \frac{2h}{R}}{1 + \ln \frac{2h}{R}}$$

(εξίσωση 2.11.11)

Από την οποία το E_f μπορεί να εκφραστεί ως :

$$E_f = \frac{U_{sp}(t)}{R \left[1 + \ln \frac{2h}{R} \right]}$$

(εξίσωση 2.11.12)

Η αύξηση της ζώνης ηλεκτρικής φόρτισης περιγράφεται από μια απλή διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dR}{dt} = \mu E_f = \frac{\mu U_{sp}(t)}{R \left[1 + \ln \frac{2h}{R} \right]}$$

(εξίσωση 2.11.13)

Για $R(t) \gg r_0$, η αντικατάσταση της εξίσωσης 2.11.13 οδηγεί στην παρακάτω διατύπωση για την χρονική αύξηση της ακτίνας R :

$$R(t) = \sqrt{\frac{2\mu \cdot (t \cdot U_{sp}(t) - t_{ci} \cdot U_{ci})}{\left[3 + 2 \ln \frac{2h}{R(t)} \right]}}$$

(εξίσωση 2.11.14)

όπου U_{ci} είναι η αρχή του χωρικού δυναμικού και t_{ci} ο χρόνος έναρξης της corona, η οποία λύνεται αριθμητικά προκειμένου να καθοριστεί το $R(t)$.

Η αντικατάσταση του $R(t)$ στην εξίσωση 2.11.12 καθορίζει το E_f , βάσει του οποίου προκύπτει το ρεύμα της corona ως:

$$i(t) = 2\pi\varepsilon_0\mu \left[E_f^2 - \left(\frac{r_0 E_{ci}}{R} \right)^2 \right]$$

(εξίσωση 2.11.15)

Το φορτίο της corona ανά μονάδα μήκους δίνεται από την εξίσωση 2.11.9.

Ομοίως, εάν η συνθήκη $R \ll h$ δεν ικανοποιείται επαρκώς, ο λογαριθμικός τύπος:

$$\ln\left(\frac{2h}{R}\right)$$

στις εξισώσεις 2.11.11-14 πρέπει να αντικατασταθεί από τον τύπο:

$$\ln\left[\frac{h + \sqrt{h^2 - R^2}}{R}\right]$$

2.11.1 Σταθερότητα της ζώνης ηλεκτρικής φόρτισης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ζώνη ultra-corona σε ένα θετικό κυλινδρικό αγωγό ακτίνας r_0 και ύψους h πάνω από το έδαφος θα παραμείνει σταθερή, δηλαδή σε κατάσταση λάμψης, εφόσον ο ρυθμός μεταβολής του χωρικού δυναμικού U_{sp} δεν ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή:

$$\frac{d}{dt}(E_a \cdot h) \leq \mu \cdot E_{ci}^2 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r_0}\right)$$

(εξίσωση 2.11.1.1)

όπου E_a είναι το μέσο περιβάλλον πεδίο.

Μια άλλη διατύπωση για την σταθερότητα της ultra corona (Rizk 2010c) προβλέπει κρίσιμο ρεύμα για corona σε λάμψη ανά μονάδα μήκους του αγωγού ίσο με:

$$i_{crit} = 2\pi\epsilon_0\mu E_{ci}^2$$

(εξίσωση 2.11.1.2)

Εάν αυτή η ένταση της corona ξεπεραστεί, τότε η ζώνη εκκένωσης corona θα γίνει ασταθής, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται επαγόμενες τάσεις.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα δειχθεί κάτω από ποιες συνθήκες μπορούν να επιτευχθούν τέτοιου είδους κρίσιμες εντάσεις της corona, εξαιτίας ενός πολύ κοντινού καθοδικού αρνητικού οδηγού. Εφόσον το στρώμα της ultra-corona είναι σταθερό, καμιά επαγόμενη τάση και συνακόλουθα κανένας ανοδικός συνδετικός οδηγός δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί από τον αγωγό αποτροπής της επαγόμενης τάσης.

2.11.2 Χωρικό δυναμικό επαγόμενο από εκκένωση corona

Έστω αγωγός αποτροπής επαγόμενης τάσης ακτίνας r_0 και ύψους h πάνω από το έδαφος, ο οποίος εμβαπτίζεται σε ένα μέσο περιβάλλον πεδίο $E_a(t)$, το οποίο αυξάνεται γραμμικά με τον χρόνο για να φτάσει την τιμή E_{gm} σε ένα χρονικό διάστημα t_0 . Η διακύμανση του φορτίου της εκκένωσης corona $q(t)$ ανά μονάδα μήκους του αγωγού δίνεται από την εξίσωση 2.11.9. Η διατύπωση για το χωρικό δυναμικό της εκκένωσης corona, σε οποιοδήποτε σημείο, σε μια απόσταση ακτίνας d από τον αγωγό θα εξαρτηθεί από το εάν ένα τέτοιο σημείο είναι μέσα ή έξω από τη ζώνη φόρτισης του χώρου της corona.

Έστω ένα σημείο μέσα στην ζώνη φόρτισης της corona, που έχει όριο πεδίου corona E_f και βρίσκεται σε μια απόσταση ακτίνας d από τον άξονα του αγωγού. Το χωρικό δυναμικό U_{ii} στο σημείο μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$U_{ii}(d) = U(R) + (R - d) \cdot E_f$$

(εξίσωση 2.11.1.3)

Για τον αρνητικό καθοδικό οδηγό, οι ακτινικές διαστάσεις της ζώνης φόρτισης θα περιοριστούν, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, έτσι ώστε τα σημεία ενδιαφέροντος για τον υπολογισμό του χωρικού δυναμικού να είναι έξω από τη ζώνη corona, δηλαδή $d > R$. Το χωρικό δυναμικό U_{io} μπορεί τότε να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$U_{io}(d) = \frac{q_t(t)}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h}{d}\right)$$

(εξίσωση 2.11.1.4)

όπου $q_t(t)$ είναι το συνολικό φορτίο ανά μονάδα μήκους του αγωγού, που προέκυψε μετά από πρόσθεση του φορτίου ανά μονάδα μήκους της επιφάνειας του αγωγού στο $q(t)$ από την εξίσωση 2.11.9.

Το χωρικό δυναμικό που επάγεται από θετική εκκένωση corona στην θέση ενός παράπλευρου αγωγού $U_i(d)$ προφανώς θα έχει αντίθετη πολικότητα, εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων και/ή εξαιτίας του καθοδικού αρνητικού οδηγού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ενεργειακού αγωγού ύψους h_c σε μια απόσταση d από ένα γειωμένο καλώδιο αποτροπής επαγόμενης τάσης ύψους h_{gw} , το αρχικό χωρικό δυναμικό του ανοδικού οδηγού θα είναι:

$$U_{ic} = U_{ico} + U_i(d)$$

(εξίσωση 2.11.1.5)

όπου U_{tco} είναι το αρχικό χωρικό δυναμικό του ανοδικού οδηγού, σε μη φορτισμένο χώρο, που σχετίζεται με το E_{gco} της εξίσωσης 2.10.1 με $h = h_c$, σύμφωνα με την σχέση:

$$U_{tco} = h_c \cdot E_{gco}$$

(εξίσωση 2.11.1.6)

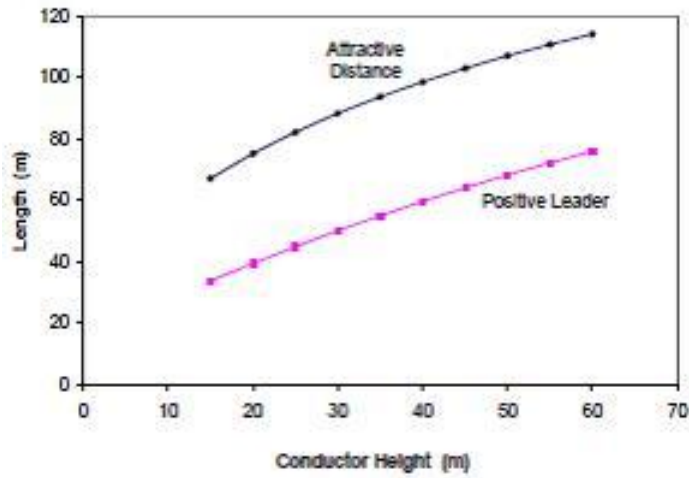
2.12 Αποτελέσματα μοντέλων

2.12.1 Η σημασία της ζώνης του θετικού οδηγού

Η Εικόνα 2.12.1.1 απεικονίζει την διακύμανση της εγκάρσιας ελκτικής απόστασης ενός κανονικού εναέριου αγωγού σε συνάρτηση με το ύψος, για ένα πλήγμα κεραυνού ρεύματος 31 kA. Η ακτίνα του αγωγού είναι 1,5 cm, η νεφελώδης βάση είναι ύψους $H_{cl}=2000m$ και το μέγιστο εδαφικό πεδίο εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων είναι 10kV/m. Επίσης απεικονίζεται το μήκος του θετικού ανοδικού συνδετικού οδηγού, ανάμεσα στις αρνητικές και θετικές κορυφές του οδηγού, την στιγμή της κατάρρευσης του ιονισμένου πλάσματος. Είναι ξεκάθαρο πως σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τύπων, ο θετικός ανοδικός συνδετικός οδηγός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διαδικασία των κεραυνικών προσπτώσεων.

Εικόνα 2.12.1.1. Διακύμανση της ελκτικής απόστασης και του μήκους του ανοδικού θετικού οδηγού με ύψος κανονικού αγωγού για ένα πιθανό επακόλουθο πλήγμα κεραυνού εντάσεως 31 kA.

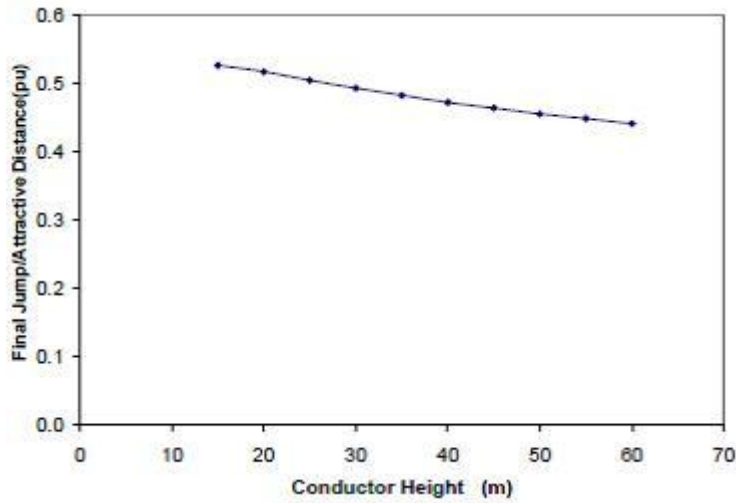
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η Εικόνα 2.12.1.2 απεικονίζει για τις ίδιες παραμέτρους όπως στην Εικόνα 2.12.1.1 το μήκος του τελικού άλματος (ανά μονάδα μήκους της εγκάρσιας ελκτικής απόστασης και σε συνάρτηση με το ύψος του αγωγού) με κατάρρευση της επαγόμενης τάσης ανάμεσα στις δυο κορυφές των οδηγών. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως, εάν ο θετικός ανοδικός συνδετικός οδηγός κατασταλεί, τότε η εγκάρσια ελκτική απόσταση του αγωγού μπορεί κατά προσέγγιση να μειωθεί κατά έναν συντελεστή της τάξεως του δύο.

Εικόνα 2.12.1.2. Διακύμανση του τελικού άλματος από την κατάρρευση της επαγόμενης τάσης ανάμεσα σε θετικούς και αρνητικούς οδηγούς ανά μονάδα μήκους της εγκάρσιας ελκτικής απόστασης, για διαφορετικά ύψη ενός κανονικού αγωγού. $I = 31 \text{ kA}$, $H_{cl}=2000\text{m}$, Μέγιστο εδαφικό πεδίο εξαιτίας της νεφελώδους φόρτισης : 10kV/m .

(Πηγή: Rizk 2010b)



2.12.2 Μοντελοποίηση της ζώνης εκκένωσης corona

Ο Πίνακας 2.12.2.1 αποτυπώνει μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των απλοποιημένων αναλυτικών λύσεων και την αριθμητική λύση, όσον αφορά στην τελική οριακή ακτίνα R της corona, το οριακό ηλεκτρικό πεδίο E_f και το φορτίο της corona $q(t_0)$, ανά μονάδα μήκους του αγωγού. Η συμφωνία κρίνεται αποδεκτή και δικαιολογεί την χρήση της απλοποιημένης αναλυτικής προσέγγισης.

Πίνακας 2.12.2.1. Σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των απλοποιημένων αναλυτικών λύσεων και την αριθμητική λύση.

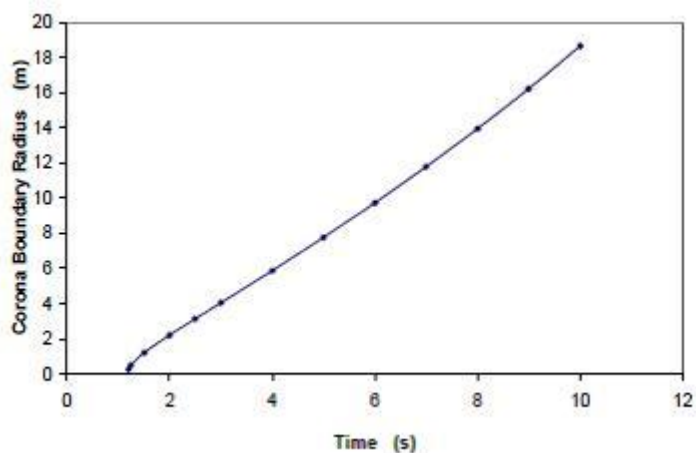
(Πηγή: Rizk 2010b)

Basic Parameters	Simplified Analytical			Numerical Solution		
	R, m	$E_f, kV/m$	$q, \mu C/m$	R, m	$E_f, kV/m$	$q, \mu C/m$
$r_0=0.005m$ $h=50m$ $E_{gm}=10kV/m$ $t_0=10s$	14.70	11.75	9.20	14.25	11.17	8.43
$r_0=0.005m$ $h=50m$ $E_{gm}=80kV/m$ $t_0=1ms$	0.286	2043	32.03	0.294	1998	32.27

Η Εικόνα 2.12.2.1 δείχνει την αύξηση της ζώνης της corona, για ένα γειωμένο καλώδιο διαμέτρου 1cm και ύψους 30m, που εμβαπτίζεται σε ένα περιβάλλον εδαφικό πεδίο με νεφελώδη φόρτιση, η οποία αυξάνεται έως 20kV/m σε 10s. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως η οριακή ακτίνα της corona φτάνει τα 18,6m, καλύπτοντας ένα μεγάλο κομμάτι του κενού εδαφικού διαστήματος που είναι γύρω από τον αγωγό. Συνεπώς, σε μια τέτοια περίπτωση, η υπόθεση για μια ζώνη corona που είναι συμμετρική γύρω από τον αγωγό δεν θα είναι ακριβής. Αυτή η κατάσταση βελτιώνεται για υψηλότερους αγωγούς ή χαμηλότερα εδαφικά πεδία. Ειδικά για ζώνες corona που δημιουργούνται από το περιβάλλον πεδίο εξαιτίας ενός αρνητικού καθοδικού οδηγού, η οριακή ακτίνα της corona θα είναι σημαντικά μικρότερη εξαιτίας του μικρότερου χρόνου που χρειάζεται, όπως δείχνεται παρακάτω. Σε αυτό το παράδειγμα, η οριακή ταχύτητα της corona v_f , σε $t = 10s$ έφτασε τα 2,35 m/s.

Εικόνα 2.12.2.1. Διακύμανση της οριακής ακτίνας της corona σε συνάρτηση του χρόνου, για ένα γειωμένο καλώδιο ύψους 30m και διαμέτρου 1cm. Μέγιστο περιβάλλον πεδίο εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων: 20 kV/m. Χρόνος αύξησης: 10s.

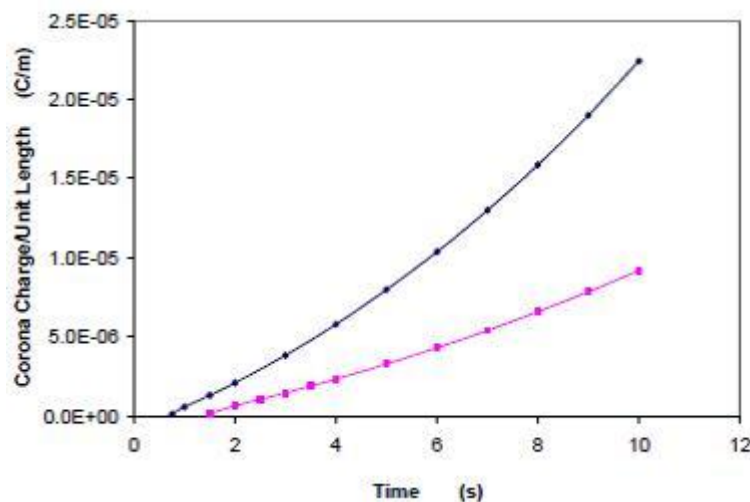
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η Εικόνα 2.12.2.2 απεικονίζει την διακύμανση, αναλόγως του χρόνου φόρτισης της εκκένωσης corona, ανά μονάδα μήκους του αγωγού στα 50 m ύψος, για μέγιστα εδαφικά πεδία που έφτασαν γραμμικά σε μια χρονική περίοδο 10s στα 20kV/m και 10kV/m. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως η φόρτιση της εκκένωσης corona αυξάνεται σημαντικά στο υψηλότερο περιβάλλον πεδίο.

Εικόνα 2.12.2.2. Διακύμανση φορτίσεως της corona ανά μονάδα μήκους σε συνάρτηση του χρόνου, ενός εδαφικού καλωδίου ύψους 50m και διαμέτρου 1cm. Μέγιστο περιβάλλον πεδίο εξαιτίας των νεφελώδων φορτίσεων: 20kV/m και 10kV/m. Χρόνος αύξησης: 10s.

(Πηγή: Rizk 2010b)

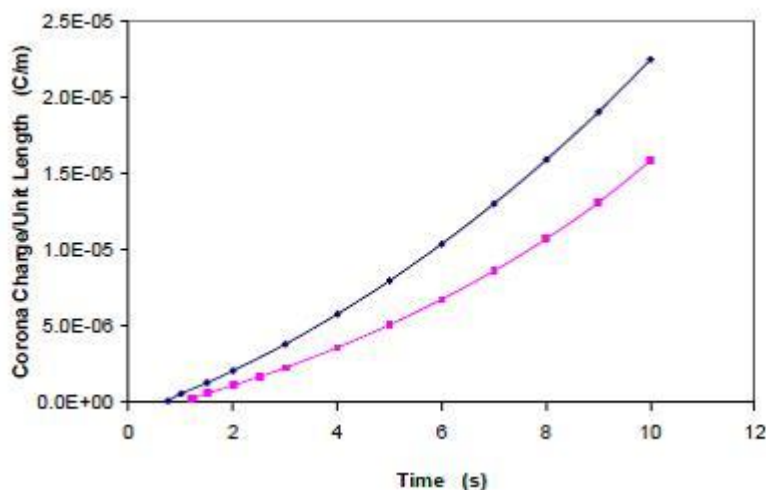


Η Εικόνα 2.12.2.3 απεικονίζει την αύξηση της φόρτισης της εκκένωσης corona σε συνάρτηση του χρόνου, για αγωγούς ύψους 50m και 30m, με μέγιστο πεδίο εξαιτίας των νεφελώδων φορτίσεων τα 20kV/m που επιτεύχθηκαν σε διάρκεια 10s. Είναι ξεκάθαρο πως κάτω από τις ίδιες συνθήκες, για τον υψηλότερο αγωγό παράγεται μεγαλύτερο φορτίο corona.

Για έναν καθοδικό οδηγό, εξομοιώθηκε η αύξηση του χωρικού δυναμικού στην θέση του αγωγού από μια γραμμική διακύμανση σε συνάρτηση του χρόνου, όπου ο χρόνος αύξησης εκτιμήθηκε ως 1,67 φορές της διάρκειας που χρειάστηκε το χωρικό δυναμικό να αυξηθεί από το επίπεδο του 30% έως το επίπεδο του 90%.

Εικόνα 2.12.2.3. Διακύμανση του φορτίου της corona ανά μονάδα μήκους ενός αγωγού 50m και 30m και διαμέτρου 1cm σε συνάρτηση του χρόνου. Μέγιστο πεδίο: 20 kV/m. Χρόνος αύξησης: 10s.

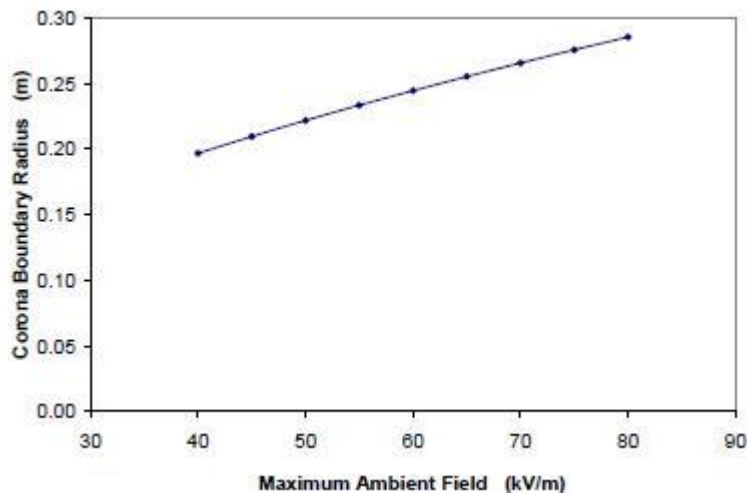
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η Εικόνα 2.12.2.4 απεικονίζει την διακύμανση της οριακής ακτίνας εξαιτίας ενός καθοδικού αρνητικού οδηγού, για έναν αγωγό διαμέτρου 1cm και ύψους 50m, για πεδία εύρους από 40-80kV/m και χρόνο αύξησης 1ms. Σε ένα πεδίο 80kV/m η ταχύτητα της corona v_f με $t=1ms$ έφτασε τα 299,6m/s.

Εικόνα 2.12.2.4. Διακύμανση της οριακής ακτίνας ενός αγωγού 50m με διάμετρο 1cm σε συνάρτηση με την γραμμική αύξηση ενός μέσου περιβάλλοντος πεδίου εξαιτίας ενός καθοδικού αρνητικού οδηγού. Χρόνος αύξησης: 1ms.

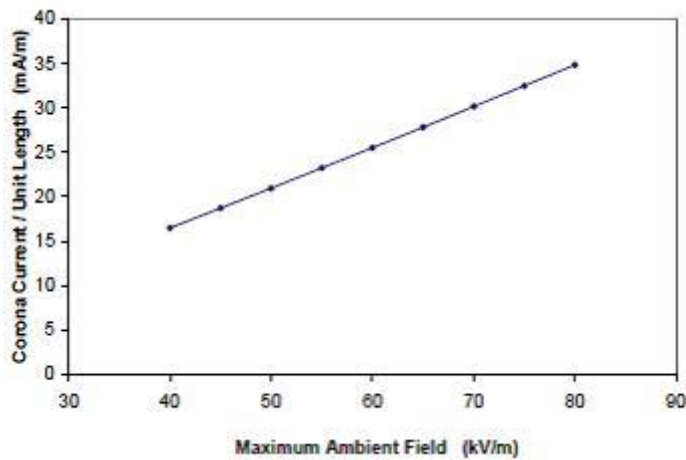
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η Εικόνα 2.12.2.5 απεικονίζει, για τις ίδιες παραμέτρους με παραπάνω, την διακύμανση του ρεύματος της corona, ανά μονάδα μήκους, σε συνάρτηση με το μέγιστο περιβάλλον πεδίο. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως πολύ περισσότερο ρεύμα της corona παράγεται σε μεγαλύτερους ρυθμούς αλλαγής του περιβάλλοντος πεδίου.

Εικόνα 2.12.2.5. Διακύμανση του μέγιστου ρεύματος corona ανά μονάδα μήκους ενός αγωγού 50m και διαμέτρου 1cm. Χρόνος αύξησης: 1ms.

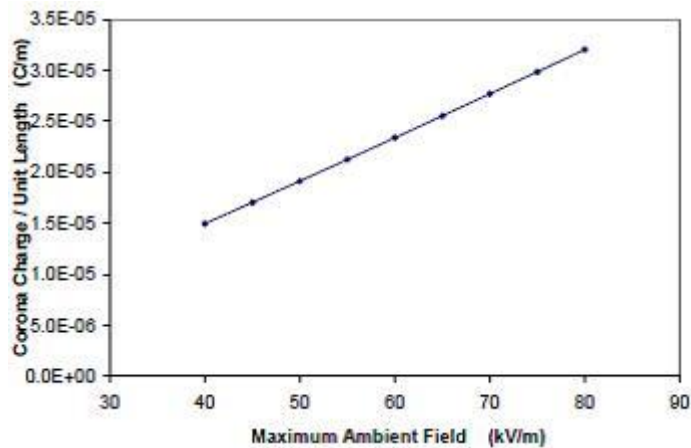
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η Εικόνα 2.12.2.6 απεικονίζει, για τις ίδιες παραμέτρους με παραπάνω, την διακύμανση του φορτίου corona ανά μονάδα μήκους ενός αγωγού, διαμέτρου 1cm, ύψους 50m, με μέγιστο περιβάλλον πεδίο που προκαλείται από έναν καθοδικό αρνητικό οδηγό μέσα στα όρια 40-80 kV/m. . Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως, παρά τον περιορισμένο χρόνο 1ms, παράγεται σημαντικό φορτίο corona. Για να φανεί η σημαντικότητα αυτών των φορτίσεων, αρκεί να θεωρήσουμε την περίπτωση μιας φόρτισης ανά μονάδα μήκους 30μC/m από αγωγό ύψους 50m, όπου το προκαλούμενο χωρικό δυναμικό σε μια ακτίνα 10m διαμορφώνεται σε 1,24MV.

Εικόνα 2.12.2.6. Διακύμανση φορτίου της corona ανά μονάδα μήκους ενός αγωγού ύψους 50m και διαμέτρου 1cm, σε συνάρτηση με ένα γραμμικά ανοδικό μέσο περιβάλλον πεδίο εξαιτίας ενός καθοδικού αρνητικού οδηγού. Χρόνος αύξησης: 1ms.

(Πηγή: Rizk 2010b)



2.12.3 Σταθερότητα της χωρικής ζώνης φόρτισης

Ένα σημαντικό μέγεθος στον καθορισμό του ρυθμού αλλαγής του χωρικού δυναμικού εξαιτίας καθοδικών πεδίων οδηγών είναι η ταχύτητα του καθοδικού αρνητικού οδηγού. Στο πλαίσιο αυτό, οι Rakon & Uman (2003) συνόψισαν διάφορες μετρήσεις και εκτιμήσεις ταχυτήτων αρνητικών οδηγών και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα ποικίλουν, ενώ ο Uman (2008) υποδεικνύει μια μέση ταχύτητα $2 \cdot 10^5$ m/s. Αυτό συμπίπτει με σχετικά πρόσφατες μετρήσεις από τους Shao *et al* (1995), όπου μια τυπική ταχύτητα αρνητικού οδηγού εντοπίστηκε στα $2 \cdot 10^5$ m/s. Στην ίδια μελέτη ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι ταχύτητες των αρνητικών οδηγών κοντά στο έδαφος σε ύψη συνηθισμένα για γειωμένα καλώδια. Στο πλαίσιο αυτό, οι Berger & Vogelsanger (1966) είχαν ήδη αναφέρει πως στην περίπτωση των αρνητικών οδηγών που έπληξαν έναν πειραματικό πυλώνα στο Monte San Salvatore, η ταχύτητα του οδηγού εμφάνιζε διαφοροποιήσεις στο εύρος $1,9 \cdot 10^5$ - $2,2 \cdot 10^5$ m/s. Σε αυτή την ανάλυση επομένως υιοθετείται μια ταχύτητα $2 \cdot 10^5$ m/s.

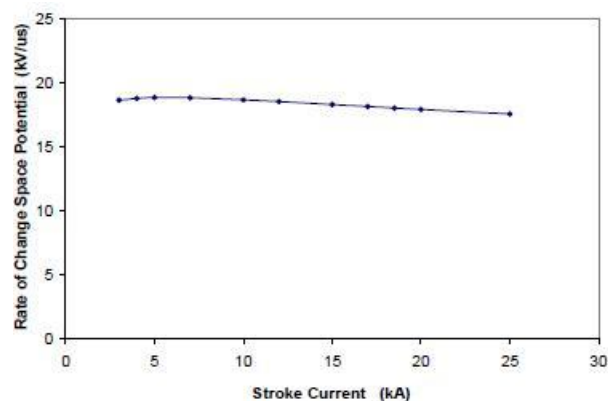
Η εγκάρσια απόσταση από έναν καθοδικό οδηγό και ένα γειωμένο καλώδιο 1cm και μήκους 30m επιλέχτηκε έτσι ώστε, καθώς ο οδηγός κατεβαίνει στο ύψος του αγωγού, το κενό ανάμεσα στον οδηγό και στον αγωγό γεφυρώνεται με την κατάρρευση της επαγόμενης τάσης, με μια μέση κλίση 500kV/m. Προκειμένου να εξακριβωθεί εάν έχει ξεπεραστεί ο κρίσιμος ρυθμός που απαιτείται για την αστάθεια της corona, θα πρέπει να καθοριστεί ο ρυθμός μεταβολής του χωρικού δυναμικού στην θέση του αγωγού. Σύμφωνα με τους Shao *et al* (1995) αυτός ο κρίσιμος ρυθμός κυμαίνεται στα 29,6kV/μs για ένα γειωμένο καλώδιο 1cm στα 40m ύψος.

Στην Εικόνα 2.12.3.1 η τάση του κεραυνού έχει αλλαχτεί σε ένα εύρος 3-25kA. Έχει βρεθεί πως την στιγμή του τελικού άλματος, ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του χωρικού δυναμικού δεν ξεπέρασε τα 18,8 kV/μs. Αυτό σημαίνει πως ο αγωγός θα διατηρήσει την σταθερότητα της ζώνης της εκκένωσης corona έως ότου ένα τελικό άλμα λάβει χώρα από την κατάρρευση της επαγόμενης τάσης.

Εικόνα 2.12.3.1. Διακύμανση του μέγιστου ρυθμού μεταβολής του χωρικού δυναμικού την στιγμή του τελικού άλματος, σε συνάρτηση με το αναμενόμενο επακόλουθο ρεύμα κεραυνού.

$hc=30m$, $r_0=5cm$. Ταχύτητα αρνητικού οδηγού: $2 \cdot 10^5$ m/s.

(Πηγή: Rizk 2010b)

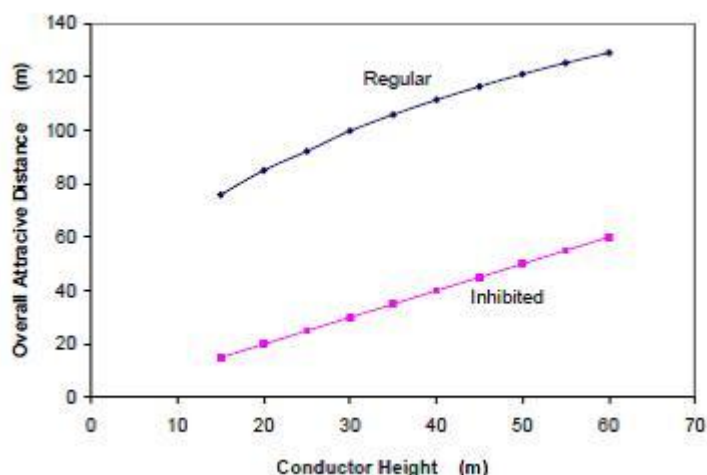


2.12.4 Έκθεση σε κεραυνούς των αγωγών αποτροπής επαγόμενης τάσης

Καθώς η σταθερότητα της ζώνης της corona θα διατηρηθεί έως την στιγμή του τελικού άλματος, έπεται πως ο θετικός ανοδικός οδηγός θα έχει σχεδόν κατασταλεί, μειώνοντας σημαντικά την συνολική ελκτική απόσταση του αγωγού. Αυτό σημαίνει πως η ηλεκτρική σκιά του γειωμένου καλωδίου αποτροπής επαγόμενης τάσης θα μειωθεί σημαντικά, σε σύγκριση με ένα κανονικό γειωμένο καλώδιο. Η κατάσταση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.4.1, όπου η συνολική ελκτική απόσταση ενός κανονικού αγωγού διαμέτρου 1cm συγκρίνεται με έναν αγωγό αποτροπής επαγόμενης τάσης των ίδιων διαστάσεων. Το πρακτικό πλεονέκτημα του αγωγού αποτροπής επαγόμενης τάσης είναι αρκετά ξεκάθαρο, ιδιαιτέρως για καταστάσεις όπου η εκκένωση αποτελεί σοβαρό πρόβλημα.

Εικόνα 2.12.4.1. Διακύμανση της συνολικής ελκτικής απόστασης ενός κανονικού αγωγού και ενός αγωγού αποτροπής επαγόμενης τάσης συναρτήσει του ύψους πάνω από το έδαφος.

(Πηγή: Rizk 2010b)



Μια άλλη πιθανή εφαρμογή είναι η τοποθέτηση ενός καθοδικού αγωγού στον έλικα μιας τουρμπίνας αέρος, όπου η καταστολή της επαγόμενης τάσης στον κάτω αγωγό θα τείνει να ευνοεί την εκδήλωση πληγμάτων στους αποκαλούμενους υποδοχείς κεραυνών, αντί των πληγμάτων που διεισδύουν στον έλικα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές ζημιές.

2.12.5 Μηχανισμός προστασίας εδαφικού καλωδίου αποτροπής επαγόμενης τάσης

Για ένα συμβατικό γειωμένο καλώδιο, η προστασία των παράπλευρων αγωγών ρεύματος επιτυγχάνεται με το να τεθεί σε κίνηση ένας συνδετικός ανοδικός οδηγός από το γειωμένο καλώδιο. Ένα θεμελιώδες ερώτημα συνεπώς που τίθεται αφορά στο ποιος θα είναι ο μηχανισμός προστασίας, στην περίπτωση που ένας αγωγός αποτροπής επαγόμενης τάσης δεν μπορεί να θέσει σε κίνηση ανοδικούς συνδετικούς οδηγούς πριν από το τελικό άλμα. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι δισδιάστατη. Ως πρώτο κριτήριο θεωρούμε ότι ο αγωγός ρεύματος θα πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να μην μπορεί να γίνει καμία κατάρρευση επαγόμενης τάσης του προστατευμένου αγωγού ρεύματος από τον αρνητικό καθοδικό οδηγό.

Η κρίσιμη γωνία θ_c που ικανοποιεί αυτό το κριτήριο μπορεί να εκφραστεί ως (Rizk 2010c):

$$\theta_c = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{h_{gw} - h_c}{h_{gw} - h_0} \right)$$

(εξίσωση 2.12.5.1)

όπου h_{gw} είναι το ύψος του γειωμένου καλωδίου αποτροπής επαγόμενης τάσης, h_c είναι το ύψος του αγωγού και h_0 είναι το ύψος που χαρακτηρίζει τα γειωμένα αντικείμενα στο πεδίο που διασχίζει η γραμμή.

Η εξίσωση 2.12.5.1 εφαρμόζεται εκεί όπου το ύψος του γειωμένου καλωδίου είναι μεγαλύτερο από την απόσταση του κεραυνικού πλήγματος από το έδαφος (Chisholm & Anderson 2003).

Το δεύτερο κριτήριο προϋποθέτει πως η σύλληψη του θετικού ανοδικού οδηγού από τον προστατευμένο αγωγό δεν θα λάβει χώρα πριν συμβεί η κατάρρευση της επαγόμενης τάσης στο γειωμένο καλώδιο αποτροπής. Αυτό επιτυγχάνεται με την θωράκιση του φορτισμένου χώρου, όπου το φορτίο της corona από το γειωμένο καλώδιο αποτροπής επαγόμενης τάσης προκαλεί τέτοιο χωρικό δυναμικό στην θέση του προστατευμένου αγωγού, ώστε να καταστείλει την έναρξη του θετικού οδηγού. Αυτό σημαίνει πως η γεωμετρική θωράκιση που είναι ήδη σε εφαρμογή μπορεί να αντικατασταθεί από την θωράκιση του φορτισμένου χώρου από έναν αγωγό αποτροπής επαγόμενης τάσης. Το παρακάτω αριθμητικό παράδειγμα περιγράφει την κατάσταση για την οποία μόλις κάναμε λόγο.

Έστω ένας πυλώνας με δυο γειωμένα καλώδια αποτροπής επαγόμενης τάσης διαμέτρου 1cm και ύψους 40m. Τα καλώδια έχουν απόσταση 12μ και οι εξωτερικοί ενεργειακοί αγωγοί βρίσκονται κάτω από τα γειωμένα καλώδια σε κατακόρυφη θέση. Το ύψος του αγωγού είναι 30μ. και επακόλουθο ρεύμα κεραυνικού πλήγματος είναι 10 kA. Ένας αρνητικός καθοδικός οδηγός έχει εγκάρσια απόσταση 20,78μ, που αντιστοιχεί σε τελικό άλμα hf από την κατάρρευση της επαγόμενης τάσης στο ύψος του γειωμένου καλωδίου. Το συνεχές χωρικό δυναμικό σύλληψης του οδηγού του αγωγού ρεύματος είναι 2016kV. Το εφαρμοσμένο χωρικό δυναμικό στην θέση του αγωγού ρεύματος την στιγμή του τελικού άλματος στο γειωμένο καλώδιο είναι 3867kV, το οποίο χωρίς θωράκιση του χώρου φόρτισης σίγουρα θα παρήγαγε έναν συνεχή ανοδικό συνδετικό οδηγό. Όμως, η χωρική φόρτιση της corona από ένα εδαφικό πεδίο 10kV/m εξαιτίας της νεφελώδους φόρτισης και η μεταβατική εκκένωση corona εξαιτίας του καθοδικού πεδίου του οδηγού διάρκειας 1ms,

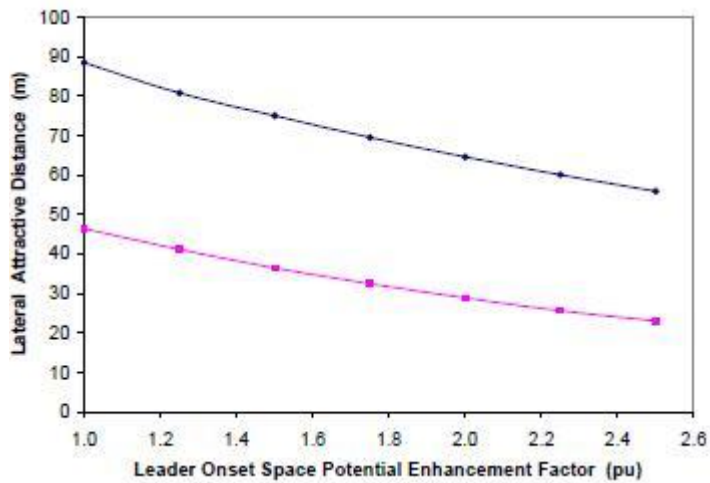
παράγουν ένα αντίθετο χωρικό δυναμικό 2201kV. Το καθαρό χωρικό δυναμικό στην θέση του αγωγού ρεύματος διαμορφώνεται συνεπώς σε 1666 kV και είναι χαμηλότερο από τα 2016kV που απαιτούνται για την έναρξη συνεχούς ανοδικού οδηγού. Ο αγωγός συνεπώς προστατεύεται επαρκώς από την θωράκιση του χώρου φόρτισης.

Σε αυτό το παράδειγμα, το χωρικό δυναμικό έχει κατασταλεί εξαιτίας της χωρικής φόρτισης κατά έναν συντελεστή $3867/1666=2,32$. Μια άλλη προσέγγιση αυτού του αποτελέσματος είναι πως το χωρικό δυναμικό σύλληψης του κρίσιμου οδηγού έχει ενισχυθεί από έναν συγκεκριμένο συντελεστή, εξαιτίας της επίδρασης της φόρτισης του χώρου.

Η Εικόνα 2.12.5.1 δείχνει την εξάρτηση της εγκάρσιας ελκτικής απόστασης από τον συντελεστή ενίσχυσης του χωρικού δυναμικού του οδηγού, για έναν αγωγό μήκους 30μ και ακτίνας 1.5cm, για δυο τιμές επακόλουθου ρεύματος από κεραυνικό πλήγμα. Οι αρχικές τιμές αντιστοιχούν σε ελκτικές αποστάσεις χωρίς επιδράσεις φορτισμένου χώρου. Από την μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως η ελκτική απόσταση έχει μειωθεί σημαντικά σε υψηλές τιμές του συντελεστή ενίσχυσης του χωρικού δυναμικού του οδηγού.

Εικόνα 2.12.5.1. Εξάρτηση της εγκάρσιας απόστασης του παράγοντα ενίσχυσης του χωρικού δυναμικού ενός συνεχούς ανοδικού οδηγού για έναν αγωγό ύψους 30μ, με αναμενόμενες επακόλουθες εντάσεις ρεύματος 31kA και 10 kA.

(Πηγή: Rizk 2010b)



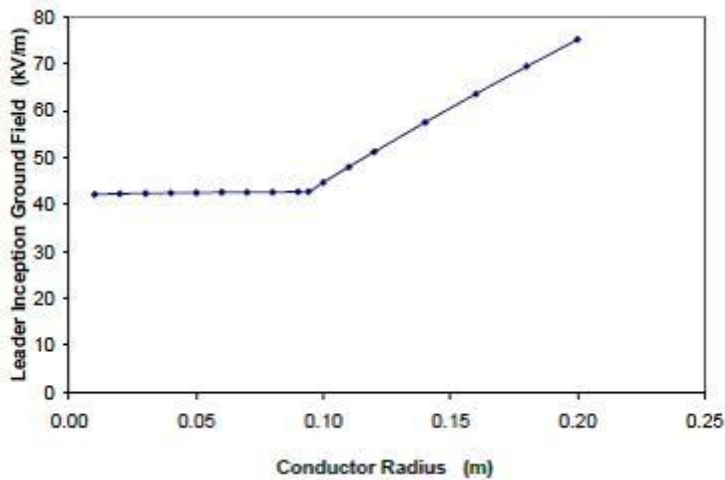
2.12.6 Τεχνικές αποτροπής επαγόμενης τάσης

Η αποτροπή της επαγόμενης τάσης στην ανάλυση που προηγήθηκε βασίζεται σε αγωγούς οι οποίοι έχουν το προτέρημα πως η απόδοση της corona μένει ανεπηρέαστη από την βροχή. Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν δύο ακόμη σχετικές τεχνικές.

Η πρώτη από αυτές είναι γεωμετρική και ανάλογη με την αύξηση της ακτίνας του αγωγού. Όμως, σύμφωνα με τους Carrara & Thione (1976) και με την Εικόνα 2.12.6.1, το μέγεθος του αγωγού έχει επίδραση στο εδαφικό πεδίο έναρξης του κρίσιμου οδηγού μόνο με ακτίνες πάνω από περίπου 10 cm, κάτι το οποίο δεν είναι καθόλου πρακτικό. Εξάλλου, τόσο μεγάλοι αγωγοί είναι επιρρεπείς σε κακή απόδοση της corona εξαιτίας επιφανειακών προεξοχών και σταγόνων νερού.

Εικόνα 2.12.6.1. Εξάρτηση έναρξης συνεχούς οδηγού σε εδαφικό πεδίο με ακτίνα αγωγού 50μ.

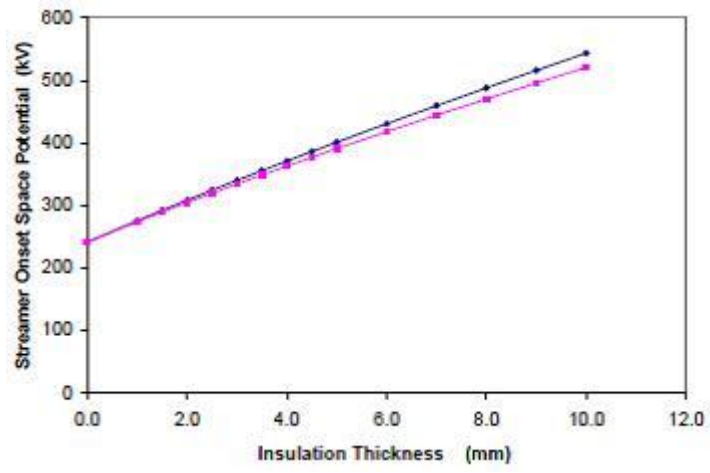
(Πηγή: Rizk 2010b)



Η άλλη τεχνική είναι εκείνη ενός μονωμένου αγωγού, διαμέτρου 1cm με στρώση μόνωσης μεταβλητού πάχους. Η Εικόνα 2.12.6.2 δείχνει πως η αύξηση του πάχους του στρώματος αυξάνει το χωρικό δυναμικό σε σύγκριση με τον αρχικό γυμνό αγωγό. Όμως, εάν συγκριθεί με έναν γυμνό αγωγό με την ίδια εξωτερική διάμετρο, τότε η επίδραση είναι αμελητέα (Abdel-Salam *et al*/ 1998). Επίσης η απόδοση της corona ενός τέτοιου μονωμένου αγωγού θα είναι ευάλωτη σε σταγόνες νερού, όπως δείχθηκε παραπάνω και η επίδραση στην έναρξη θετικού ανοδικού οδηγού θα είναι αμελητέα. Εμπειρικά πειράματα (Geldenhuys 2005) έχουν δείξει πως μονωμένοι αγωγοί χαμηλής τάσεως υποφέρουν από διατρήσεις που έχουν προκληθεί από κεραυνούς και το γεγονός αυτό θέτει το ερώτημα της επιλογής της μόνωσης των αγωγών για βελτιωμένη απόδοση απέναντι στους κεραυνούς.

Εικόνα 2.12.6.2. Διακύμανση του χωρικού δυναμικού από επαγόμενη τάση ενός μονωμένου αγωγού 1cm σε συνάρτηση με το πάχος του στρώματος μόνωσης (πάνω καμπύλη) και με έναν γυμνό αγωγό με ίδια εξωτερική διάμετρο (κάτω καμπύλη).

(Πηγή: Rizk 2010b)



Κεφάλαιο 3. Αλληλεπίδραση μεταξύ κεραυνικής εκκένωσης και ηλεκτρικού πυλώνα

3.1 Γενικά στοιχεία

Για την ανάλυση της επίπτωσης ενός κεραυνικού πλήγματος πάνω σε ένα δίκτυο ισχύος, που προκαλεί σοβαρές βλάβες και δυσλειτουργίες, έχουν διεξαχθεί μια σειρά από μετρήσεις και μελέτες (Lim *et al* 1979). Όμως, η διεξαγωγή των μετρήσεων είναι συνήθως ένα δύσκολο και ακριβό εγχείρημα, οπότε είναι απαραίτητο να αναλύσουμε το παραπάνω πρόβλημα με την χρήση μοντέλων. Στις ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστεί μια μοντελοποίηση βασισμένη σε προσομοίωση της γραμμής μεταφοράς και στην χρήση της μεθόδου επίλυσης των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD), με την οποία ασχοληθήκαμε και στο πρώτο κεφάλαιο. Στην προσέγγιση αυτή, ο πυλώνας θεωρείται πως είναι ένα ισοδύναμο ακτινικό δίκτυο αγωγών που διεγείρεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα καλώδια έχουν όλα ανοιχτές άκρες, ενώ μόνο το κάτω άκρο που έρχεται σε επαφή με το έδαφος συνδέεται άμεσα με τη γείωση.

Τελικά, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μέσω της εφαρμογής της μεθόδου FDTD, για την περίπτωση των επιδράσεων των έμμεσων κεραυνικών πληγμάτων θα συγκριθούν με αυτά που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού NEC4 (Burke 1992), ενώ για την περίπτωση των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων θα συγκριθούν με εκείνα που προκύπτουν από την μέθοδο προσαρμογής διανύσματος (Gao *et al* 2006).

3.2 Μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μιας κεραυνικής εκκένωσης και ενός πυλώνα

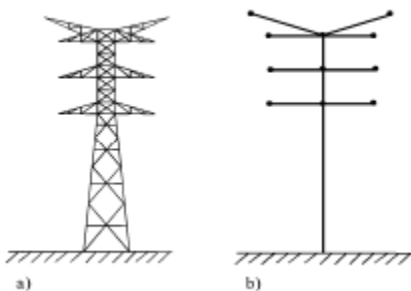
3.2.1 Ανάλυση ακτινικού δικτύου στο πεδίο του χρόνου με την θεωρία των γραμμών

Κατά την διάρκεια των προηγούμενων ετών, έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί διάφορα μοντέλα πυλώνων, κύριος σκοπός των οποίων είναι να αναλυθεί η μεταβατική συμπεριφορά τους σε άμεσα πλήγματα κεραυνών. Μεταξύ αυτών των μοντέλων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του «πολυόροφου» μοντέλου, το οποίο αναπαριστά τον πυλώνα με ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις σε κάθε όροφο.

Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης υιοθετούμε το μοντέλο εκείνο που αντιπροσωπεύει έναν πυλώνα με πολλά διασυνδεδεμένα τμήματα συμπεριλαμβανομένων και των βραχιόνων. Η αναπαράσταση του πυλώνα με τον τρόπο που μόλις περιγράψαμε απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.1.1.

Εικόνα 3.2.1.1. Ηλεκτρικός πυλώνας και η ισοδύναμη απεικόνισή του με διασυνδεδεμένους αγωγούς.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Από δω και στο εξής, για να καθορίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα, υιοθετούμε την παρακάτω σημειογραφία με δείκτες που υποδεικνύουν το τμήμα της γραμμής και τον κόμβο.

v_j *indice of node*
indice of line

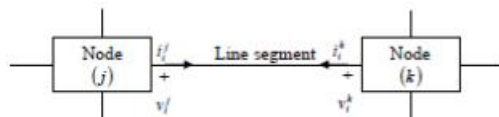
ΚΑΙ

 v_k *indice of node*
indice of line

Οι τάσεις και τα ρεύματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 3.2.1.2 υποδηλώνουν την τάση και το ρεύμα σε όλους τους κόμβους στο ισοδύναμο δίκτυο του πυλώνα.

Εικόνα 3.2.1.2. Προσδιορισμός τάσεων και εντάσεων στο τέλος κάθε τμήματος γραμμής.

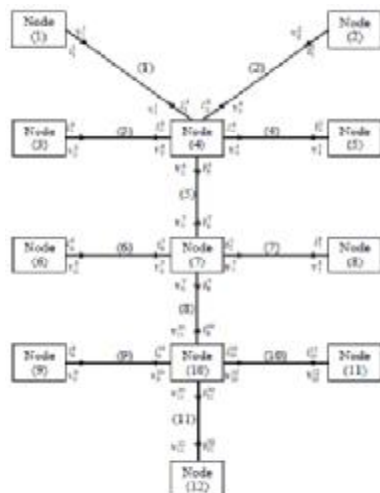
(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Η Εικόνα 3.2.1.3 απεικονίζει έναν συμβατικό πυλώνα ως ένα σύνολο ευθύγραμμων τμημάτων (οριζόντιων και κάθετων αγωγών) που συνδέονται μέσω εσωτερικών διασυνδεδεμένων κόμβων (συνδέσεις).

Εικόνα 3.2.1.3. Τοπολογική προσέγγιση ενός ηλεκτρικού πυλώνα.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Για να μελετήσουμε το πρόβλημα της μεταβατικής μετάδοσης κύματος κατά μήκος ενός ηλεκτρικού πυλώνα που διεγείρεται από μια γεννήτρια ρεύματος ή που φωτίζεται από ένα εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, πρέπει να λύσουμε την παρακάτω εξίσωση πινάκων (Kaouche *et al* 2007, Paul 1994):

$$[A][X] = [B]$$

(εξίσωση 3.2.1.1)

όπου:

[A]: είναι ο πίνακας των στοιχειωδών κυκλωμάτων της τοπολογίας του δικτύου που αντιπροσωπεύει την μετάδοση στα τμήματα των γραμμών (πίνακας [A1]) και την σχέση ανάμεσα στο ηλεκτρικό ρεύμα και την τάση στους κόμβους (πίνακας[A2]).

[X]: είναι το διάνυσμα των αγνώστων ρεύματος και τάσεως σε όλους τους κόμβους.

[B]: είναι το διάνυσμα διέγερσης που αποτελείται από δυο επιμέρους διανύσματα [B1] και [B2], τα οποία μπορεί να αντιπροσωπεύουν είτε μια γεννήτρια παραγωγής κεραυνικών εντάσεων είτε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Η προτεινόμενη προσέγγιση οδηγεί στην λύση του συστήματος των μερικών διαφορικών εξισώσεων (μετάδοση πάνω στα τμήματα των γραμμών) με σχέσεις τάσεως-ρεύματος πάνω στους κόμβους.

3.2.1.1 Απεικόνιση της γραμμής στο πεδίο του χρόνου με ένα τετράπολο

Η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και μια κατασκευή από μεταλλικό σύρμα μπορεί να αναλυθεί στο πεδίο

του χρόνου χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της γραμμής μεταφοράς με εφαρμογή του απλοποιημένου μοντέλου Taylor σύμφωνα με τις κάτωθι εξισώσεις (Paul 1994):

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = v_s(x,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = i_s(x,t) \end{cases}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.1)

όπου

L, R και C είναι οι μοναδιαίες παράμετροι των γραμμών που αναφέρονται είτε σε κάθετους αγωγούς (Ametani *et al* 1994, Gutierrez *et al* 2002) είτε σε οριζόντιους (Galloway *et al* 1964)

και

$v_s(x,t)$ και $i_s(x,t)$ είναι οι ισοδύναμες πηγές τάσεως και ρεύματος εξαιτίας ενός κεραυνικού κύματος (Kaouche *et al* 2007).

$$v_s(x,t) = -\frac{\partial \xi_T(x,t)}{\partial x} + \xi_L(x,t)$$

$$i_s(x,t) = -C \cdot \frac{\partial \xi_T(x,t)}{\partial t}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.2 και εξίσωση 3.2.1.1.3, αντιστοίχως)

με
$$\xi_T(x,t) = \int_0^h E_z^e(x,z,t) dz$$

και

$$\xi_L = E_x^e(x,h,t)$$

Εν απουσία ενός εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος θέτουμε $v_s(x,t)=0$ και $i_s(x,t)=0$.

Για την μελέτη ενός δικτύου που φωτίζεται από ένα μεταβατικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα ή απλά τροφοδοτείται από μια μεταβατική γεννήτρια ρεύματος ή τάσης τοπικά σε έναν κόμβο, χρησιμοποιούμε την αριθμητική μέθοδο FDTD. Για τον σκοπό αυτόν, οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από πεπερασμένες διαφορές, χρησιμοποιώντας την παρακάτω διακριτή σημειογραφία:

$$v_k^n \equiv v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]$$

$$i_k^n \equiv i\left[\left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta x, \left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta t\right]$$

$$\xi_{T k}^n \equiv \xi_T[(k-1)\Delta x, n\Delta t]$$

$$\xi_{L k}^n \equiv \xi_L\left[\left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta x, \left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta t\right]$$

(εξίσωση 3.2.1.1.4, εξίσωση 3.2.1.1.5, εξίσωση 3.2.1.1.6 και εξίσωση 3.2.1.1.7, αντιστοίχως)

Επίσης έχουμε ότι:

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)v_1^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)v_1^{n-1} - \frac{i_1^{n-1/2} - i_0^{n-1/2}}{\Delta x/2} - C \frac{(\xi_T)_{h_1}^n - (\xi_T)_{h_1}^{n-1}}{\Delta t}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.8)

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)v_{k_{\max}+1}^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)v_{k_{\max}+1}^{n-1} - \frac{i_{k_{\max}+1}^{n-1/2} - i_{k_{\max}}^{n-1/2}}{\Delta x/2} - C \frac{(\xi_T)_{k_{\max}+1}^n - (\xi_T)_{k_{\max}+1}^{n-1}}{\Delta t}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.9)

Υπολογίζουμε τα ρεύματα και τις τάσεις στους κόμβους που βρίσκονται στις άκρες των δικτύων. Για αυτό το σκοπό δημιουργούμε δυο επιπλέον κόμβους ρεύματος στο τέλος της γραμμής (για $x=0$ και $x=L$). Θεωρούμε:

- ο για $x=0$:

$$v_1^n = (v(0))^n$$

και

$$i_0^{n-1/2} = (i(0))^{n-1/2}$$

- ο για $x=L$

$$v_{k_{\max}+1}^n = (v(L))^n$$

και

$$i_{k_{\max}+1}^{n-1/2} = (i(L))^{n-1/2}$$

Επίσης υποθέτουμε τις εξής προσεγγίσεις:

$$(i(0))^{n-1/2} = \frac{(i(0))^n + (i(0))^{n-1}}{2}$$

$$(i(L))^{n-1/2} = \frac{(i(L))^n + (i(L))^{n-1}}{2}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.10 και εξίσωση 3.2.1.1.11, αντιστοίχως)

Συνεπώς αποκτούμε την εξίσωση για το πρώτο άκρο της γραμμής:

$k=1$ ($x=0$):

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(0))^n + \frac{1}{\Delta x}(i(0))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(0))^{n-1} - \frac{1}{\Delta x}(i(0))^{n-1} + \frac{2i_1^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_T)_1^n - (\xi_T)_1^{n-1}}{\Delta t}$$

(εξίσωση 3.2.1.1.12)

Στο δεύτερο άκρο της γραμμής έχουμε ότι:

$$k = k_{\max} + 1 \quad (x = L):$$

$$\left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(L))^n + \frac{1}{\Delta x}(i(L))^n = \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(L))^{n-1} - \frac{1}{\Delta x}(i(L))^{n-1} + \frac{2f_{k_{\max}}^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_T)_{k_{\max}+1}^n - (\xi_T)_{k_{\max}+1}^{n-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

(εξίσωση 3.2.1.1.13)

Έτσι εξάγουμε την μορφή που αντιπροσωπεύεται από το τετράπολο:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (v(0))^n \\ (i(0))^n \\ (v(L))^n \\ (i(L))^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(i(0))^{n-1} - \frac{2f_1^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_T)_1^n - (\xi_T)_1^{n-1}}{\Delta t} \\ \left(\frac{C}{\Delta t}\right)(v(L))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x}(i(L))^{n-1} - \frac{2f_{k_{\max}}^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_T)_{k_{\max}+1}^n - (\xi_T)_{k_{\max}+1}^{n-1}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (15)$$

(εξίσωση 3.2.1.1.14)

3.2.1.2 Κατασκευή των υποπινάκων [A1] και [A2]

Ο υποπίνακας [A1] λαμβάνεται από την εξίσωση 3.2.1.1.14. Η συμβολή της γραμμής με δείκτη i έχει ως εξής:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & -\frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 & \dots \\ & [0] & [0] & \left(\frac{C}{\Delta t}\right) & \frac{1}{\Delta x} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

(εξίσωση 3.2.1.2.1)

Ο υποπίνακας [A2] προκύπτει με χρήση των νόμων Kirchhoff για την τάση και το ρεύμα σε κάθε κόμβο m του πυλώνα (Kaouche *et al* 2007, Paul 1994):

$$\sum_{k=1}^N (Y_k^m [v_k^m] + Z_k^m [i_k^m]) = [P^m]$$

(εξίσωση 3.2.1.2.2)

όπου τα $[Z_k^m]$ $[Y_k^m]$

είναι πίνακες που προκύπτουν από την εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff σε κόμβο m και τις αντιστάσεις του κόμβου του δικτύου με δείκτη m , ενώ P^m είναι το διάνυσμα του ρεύματος ή των τοπικών πηγών τάσεως.

3.2.1.3 Κατασκευή των υποπινάκων [B1] και [B2]

Το δευτερεύον διάνυσμα [B1] προκύπτει από το δεύτερο σκέλος του συστήματος πινάκων της εξίσωσης 3.2.1.1.14. Για τον αγωγό με δείκτη i , για $t=n \cdot \Delta t$ έχουμε ότι:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C}{\Delta t} \right) (v_i(0))^{n-1} + \frac{1}{\Delta x} (i_i(0)) - \frac{2i_{i1}^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_{i1}^n)^n - (\xi_{i1}^{n-1})^n}{\Delta t} \\ \left(\frac{C}{\Delta t} \right) (v_i(L))^{n-1} - \frac{1}{\Delta x} (i_i(L)) + \frac{2i_{ik_{max}}^{n-1/2}}{\Delta x} - C \frac{(\xi_{ik_{max}}^n)^n - (\xi_{ik_{max}}^{n-1})^n}{\Delta t} \end{bmatrix}$$

(εξίσωση 3.2.1.3.1)

Τα ρεύματα υπολογίζονται από τις επαναλαμβανόμενες εξισώσεις.

Όσον αφορά $i_{i1}^{n-1/2}$ $i_{ik_{max}}^{n-1/2}$ στην επίδραση της έμμεσης εκκένωσης κεραυνού, το δευτερεύον διάνυσμα [B2] είναι μηδέν αλλά στην περίπτωση άμεσης πρόσκρουσης, εισάγουμε μια τοπική ηλεκτρογεννήτρια με αναλυτική διατύπωση που σχετίζεται με μια διπλή εκθετική συνάρτηση. Στην περίπτωση μιας άμεσης εκκενώσεως κεραυνού το δευτερεύον διάνυσμα [B1] είναι μηδέν.

3.2.1.4 Κατασκευή του αγνώστου διανύσματος $[X]$

Το διάνυσμα $[X]$ περιλαμβάνει τα άγνωστα ρεύματα και τάσεις σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Για τον κόμβο με δείκτη i έχουμε για $t=n*\Delta t$:

$$[X] = [\dots (v_i(t))^n \ (i_i(t))^n \ (v_i(L))^n \ (i_i(L))^n \dots]^{transpose}$$

(εξίσωση 3.2.1.4.1)

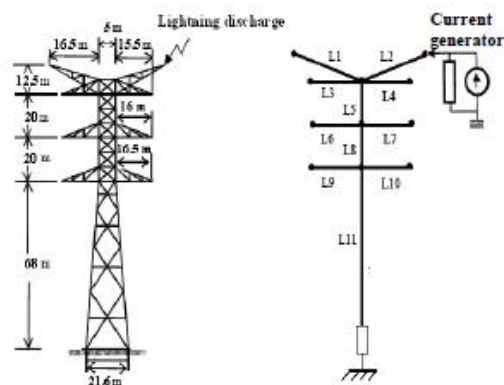
3.3 Τεκμηρίωση

3.3.1 Ανάλυση επιπτώσεων της άμεσης εκκενώσεως κεραυνού σε έναν πυλώνα

Προκειμένου να κάνουμε μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δικών μας υπολογισμών και σε άλλα που έχουν δημοσιευθεί (Gao *et al* 2006), εξετάζουμε την τοπολογία του πυλώνα υπερυψηλής τάσης που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.1.1.

Εικόνα 3.3.1.1. Τοπολογία για την μελέτη της άμεσης πρόσπτωσης.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Το μοντέλο άμεσης πρόσπτωσης αντιπροσωπεύεται από μια εκθετική πηγή ρεύματος:

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

όπου

$$I_0 = 1,06537 \text{ kA,}$$

$$\alpha = 1.88 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$$

και

$$\beta = 1.6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Ο πυλώνας είναι συνδεδεμένος στην βάση του με μια τετράγωνη γείωση (21,6μ x 21,6μ). Η μοντελοποίησή μας για την άμεση πρόσπτωση γίνεται χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση του πυλώνα στο ρεύμα στην βάση του κεραυνικού διαύλου. Οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους των διαμηκών και εγκάρσιων οριζόντιων και κεκλιμένων τμημάτων υπολογίζονται σύμφωνα με τους Galloway *et al* (1964), ενώ για τα κατακόρυφα τμήματα, οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους υπολογίζονται σύμφωνα με τους Ametani *et al* (1994).

Στον Πίνακα 3.3.1.1, έχουμε ομαδοποιήσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον πυλώνα που χρησιμοποιούμε για τις εφαρμογές μας.

Πίνακας 3.3.1.1. Διαφορετικές αποστάσεις που σχετίζονται με τον υπό μελέτη πυλώνα.

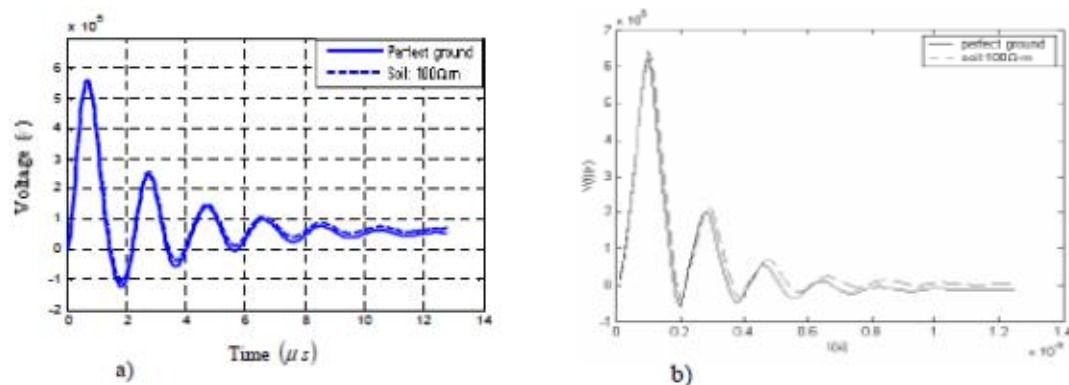
(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)

Distance between two arms of phases	20.7 m
Distance between arm and cable guard	5.2 m
Diameter of vertical column of tower	0.3 m
Height of vertical column of tower	57.6 m
Diameter of arms	0.2 m
Length of arm phase (horizontal)	7.2 m
Length of arm cable guard (inclined)	9.96 m

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας (Εικόνες 3.3.1.2(a) και 3.3.1.3(a)) βρίσκονται σε συμφωνία, ιδιαίτερα όσον αφορά στον χρόνο ανόδου και απόσβεσης, με εκείνα που δημοσιεύτηκαν από τους Gao *et al* (2006) (Εικόνες 3.3.1.2(b) και 3.3.1.3(b)) με την μέθοδο προσαρμογής διανύσματος, όπου ένα κύκλωμα RLC αναπαριστά τον ηλεκτρικό πυλώνα.

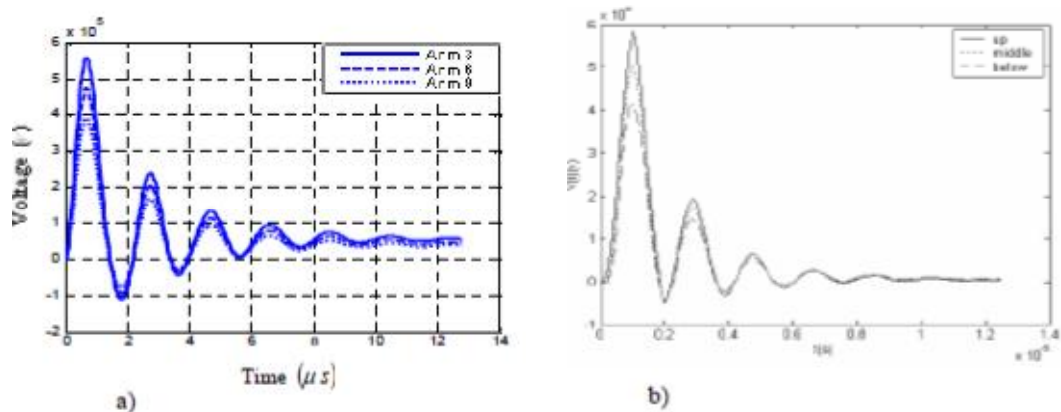
Εικόνα 3.3.1.2. Τάση στην κορυφή του πυλώνα: (a) το αποτέλεσμα του υπολογισμού μας - (b) δημοσιευμένα αποτελέσματα από τους Galloway *et al* (1964).

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Εικόνα 3.3.1.3. Τάση σε διαφορετικούς βραχίονες: (a) το αποτέλεσμα του υπολογισμού μας - (b) δημοσιευμένα αποτελέσματα από τους Galloway *et al* (1964).

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)

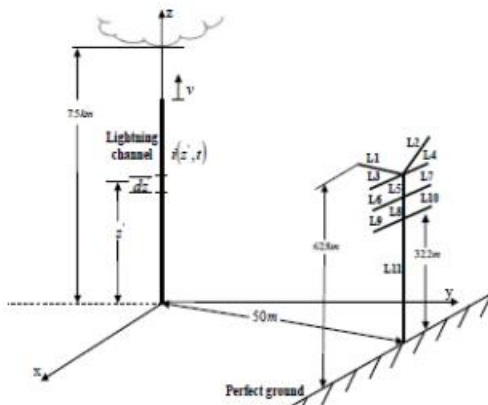


3.3.2 Ανάλυση επιπτώσεων της έμμεσης εκκενώσεως κεραυνού σε έναν πυλώνα

Στην ενότητα αυτή θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας με εκείνα που προέκυψαν από το λογισμικό NEC-4, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, για την γεωμετρία που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.2.1.

Εικόνα 3.3.2.1. Γεωμετρία του προβλήματος.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Έστω ένας ηλεκτρικός πυλώνας ύψους 62μ που βρίσκεται πάνω σε ένα τέλεια αγώγιμο εδάφους και συνδέεται στην βάση του με μια αντίσταση γείωσης $R=60\Omega$. Αυτός ο πυλώνας φωτίζεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που παράγεται από ένα κεραυνικό πλήγμα σε μια απόσταση 50μ από τον πυλώνα. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υπολογίζεται με την θεωρία των διπόλων (Uman *et al* 1975), που σχετίζεται με την αρχή της υπέρθεσης. Ο κεραυνικός διάυλος απεικονίζεται από μια ισοδύναμη κάθετη κεραία ύψους 7,5 χιλιομέτρων. Το ρεύμα κατά μήκος του διαύλου διέπεται από το μοντέλο MTL (Rachidi *et al* 1990) με μια τυπική τιμή ταχύτητας κίνησης του επιστρεφόμενου πλήγματος $v=1,3 \cdot 10^8$ m/s και έναν ρυθμό εξασθένησης της δύναμης του ρεύματος $\lambda=2$ km.

Το ρεύμα βάσης του δίαυλου δίδεται από:

$$i(t) = I_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)),$$

με $\alpha = 3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}, \beta = 10^7 \text{ s}^{-1}$

και

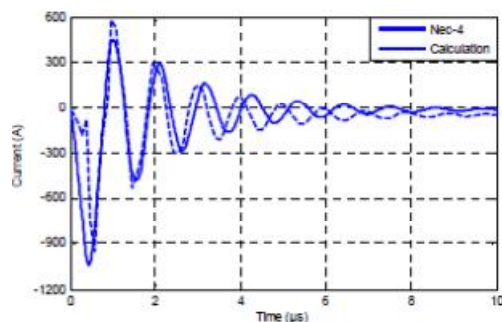
$$I_0 = 10 \text{ kA}.$$

Οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους του πυλώνα (κάθετα, οριζόντια και κεκλιμένα τμήματα) υπολογίζονται σύμφωνα με τους Gutierrez *et al* (2002) και Galloway *et al* (1964).

Η αντιπαράθεση ανάμεσα στις δύο κατηγορίες αποτελεσμάτων (Εικόνες 3.3.2.2 και 3.3.2.3) δείχνει μια σαφώς αποδεκτή ομοφωνία, ειδικά στον βηματισμό, με μια μικρή διαφορά στην καθυστέρηση και στο πλάτος. Αυτή η μικρή διαφορά υπάρχει επειδή ο κώδικας NEC-4 βασίζεται στην ανάλυση συχνότητας διαφορικών εξισώσεων σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία με την μέθοδο των ροπών και απαιτεί την χρήση μετασχηματισμού Fourier για την μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας και αντίστροφα.

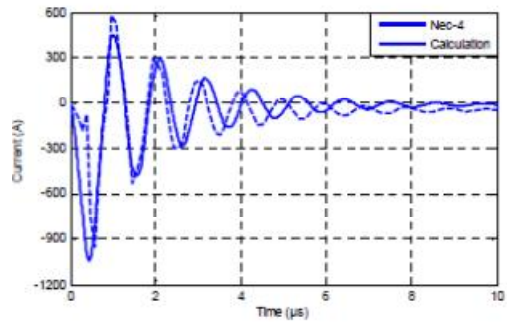
Εικόνα 3.3.2.2. Ρεύμα που προκαλείται στην κορυφή του τμήματος 5.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Εικόνα 3.3.2.3. Ρεύμα που προκαλείται στην βάση του πυλώνα.

(Πηγή: Boufenneche *et al* 2010)



Κεφάλαιο 4. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των εναερίων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης έναντι των κεραυνών.

Για τον σκοπό αυτόν, στο πρώτο κεφάλαιο, μετά την συνοπτική θεωρητική παρουσίαση σχετικά με τις ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, τους κεραυνούς, τα χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο λειτουργίας τους, μελετήσαμε την περίπτωση της προσομοίωσης των εναερίων γραμμών μεταφοράς ως προς τις κεραυνικές προσπτώσεις, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain – FDTD) και του αλγορίθμου Yee. Η μέθοδος FDTD επιλέχτηκε διότι είναι επαρκής για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Maxwell, προκειμένου να αποκομιστούν ακριβείς μεταβατικές λύσεις όσον αφορά στις εκκενώσεις κεραυνών που συμβαίνουν στα συστήματα ενέργειας.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου μελετήσαμε την περίπτωση της προσομοίωσης των μεταβατικών τάσεων των εφεδρικών δικτύων ενέργειας μιας μεγάλης εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο της άμεσης πρόσπτωσης κεραυνού στην εναέρια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης. Προκειμένου, λοιπόν, να αναλυθούν οι μεταβατικές τάσεις των κεραυνών που προκύπτουν μετά από ένα άμεσο πλήγμα κεραυνού πάνω σε μια ομάδα αγωγών φάσης των εναερίων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που βρίσκονται κοντά σε μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, απαιτούνται αριθμητικές προσομοιώσεις για ένα τυπικό βοηθητικό κύκλωμα ενέργειας, οι οποίες περιλαμβάνουν όλους τους τυπικούς συντελεστές ενός εφεδρικού δικτύου ενέργειας στα διαφορετικά επίπεδα τάσης. Τα μοντέλα για την προσομοίωση λαμβάνονται είτε από κανονισμούς (π.χ. ρεύματα κεραυνών, γραμμές διανομής, κ.λπ.) ή αναπτύσσονται με βάση τα υπάρχοντα πρότυπα σε εκτενέστερο βαθμό και οι αριθμητικές προσομοιώσεις διεξάγονται

με ένα πρόγραμμα δικτυακής ανάλυσης για διαφορετικές παραμέτρους και συνδυασμούς παραμέτρων (απειλή κεραυνού, τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης ενέργειας, μήκος καλωδίων).

Ο πυρήνας του δευτέρου κεφαλαίου της εργασίας ήταν το ζήτημα της προστασίας των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Στο πλαίσιο αυτό αρχικά πραγματοποιήθηκε το αντικείμενο της πιθανότητας αναχαίτισης των κεραυνών ως προς την απόδοση της προστασίας των γραμμών. Η απόδοση της προστασίας των εναέριων γραμμών μεταφοράς αξιολογείται την βοήθεια ενός στατιστικού μοντέλου κεραυνικών προσπτώσεων, το οποίο εξετάζει την επίδραση των παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς, την κατανομή του μεγίστου ρεύματος από τους κεραυνούς και την πιθανότητα αναχαίτισης. Η εφαρμογή του μοντέλου έχει πραγματοποιηθεί σε αρκετές εναέριες γραμμές μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων και περιπτώσεων στο σύστημα μεταφοράς της Ελλάδος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με εκείνα που εξάγονται από την εφαρμογή των πλέον διαδεδομένων ηλεκτρομαγνητικών μοντέλων στην ανάλυση προστασίας. Οι κύριες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στην τιμή και το ρυθμό αύξησης, όσο μεγαλώνει η γωνία προστασίας και το ύψος της γραμμής μεταφοράς, ειδικά για σχετικά μεγάλες γωνίες και υψηλές γραμμές μεταφοράς. Σε κάθε περίπτωση, για όλα τα μοντέλα κεραυνικών προσπτώσεων που εφαρμόζονται στην ανάλυση προστασίας ο εκτιμώμενος ρυθμός σφάλματος προστασίας αρκετών εναέριων γραμμών μεταφοράς συμφωνεί ποιοτικά αλλά όχι ποσοτικά με τα δεδομένα της επιτόπιας έρευνας.

Υπό αυτό το πρίσμα εξετάστηκε περαιτέρω η προστασία των εναέριων γραμμών μεταφοράς από κεραυνούς με την χρήση απαγωγέων πολυθαλάμων και μονωτήρων. Πράγματι, έχουν αναπτυχθεί MCS που εξασφαλίζουν την καταστολή της εκκένωσης που ακολουθεί μια υπερτασική κεραυνική διέγερση και μάλιστα τα MCS καθιστούν πιθανή την ανάπτυξη

απλών, φτηνών και αποδοτικών απαγωγέων. Ειδικότερα, σε ένα εναέριο σιδηροδρομικό σύστημα επικοινωνίας των 3 kV DC, τα MCS καταστέλλουν την εκκένωση αμέσως μετά από μια υπερτασική κεραυνική διέγερση χωρίς κάποια επακόλουθη τάση. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί MCIA που αποτελούνται από μονωτές και MCS, που τοποθετούνται στην περίμετρο του μονωτικού σώματος, χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά τις μονωτικές ικανότητες των μονωτήρων. Τελικά, η εφαρμογή των MCIA μπορεί να εγγυηθεί αξιόπιστη προστασία των εναέριων γραμμών, σε οποιαδήποτε τάση, από επαγόμενες υπερτάσεις και από άμεσα πλήγματα κεραυνών.

Αναφορικά με την επίδραση της αποτροπής θετικής επαγόμενης τάσης σε εναέριους αγωγούς από άμεσα πλήγματα κεραυνών, ένα νέο απλοποιημένο μοντέλο ερμηνεύει την έναρξη και τον χρόνο ανάπτυξης του φαινομένου κορώνα (εκκένωση corona), εξαιτίας νεφελωδών ηλεκτρικών φορτίων ή καθοδικών οδηγών, ενός υπέργειου κυλινδρικού αγωγού. Στο σκηνικό αυτό, σημαίνοντα ρόλο διαδραματίζει ο ανοδικός συνδετικός οδηγός, καλύπτοντας ένα σημαντικό κομμάτι από την εγκάρσια ελκτική απόσταση ενός αγωγού και δικαιολογώντας έτσι το ενδιαφέρον για την καταστολή των ανοδικών οδηγών. Αναλυτικότερα, το φορτίο της εκκένωσης corona ανά μονάδα μήκους του αγωγού από ένα καλώδιο στο έδαφος, αυξάνει με το ύψος του αγωγού και με το μέγιστο περιβάλλον πεδίο εξαιτίας των νεφελωδών φορτίσεων, ενώ το επαγόμενο χωρικό δυναμικό, εξαιτίας του φορτίου της corona από ένα καλώδιο στο έδαφος, εμποδίζει την διαμόρφωση ανοδικού οδηγού από γειτνιάζοντες αγωγούς ρεύματος, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της εγκάρσιας ελκτικής απόστασης.

Τέλος, όσον αφορά στην αλληλεπίδραση ανάμεσα σε έναν κεραυνό και έναν ηλεκτρικό πυλώνα, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσω της μοντελοποίησης των γραμμών μεταφοράς, που λαμβάνει υπόψη τους διαφορετικούς βραχίονες και μεταχειρίζεται τον πυλώνα ως ένα ακτινικό δίκτυο

διασυνδεδεμένων αγώγιμων γραμμών. Αυτή η άμεση τεχνική στο πεδίο του χρόνου βασίζεται στην μέθοδο επίλυσης των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) και στην αντιμετώπιση των άμεσων και έμμεσων πληγμάτων κεραυνού σε πυλώνα. Με άλλα λόγια, η διατύπωση βασίζεται στην θεωρία των γραμμών μεταφοράς ενώ η αριθμητική λύση πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου FDTD. Η σύγκριση ανάμεσα στα αριθμητικά αποτελέσματα και σε εκείνα που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού NEC-4 αποδεικνύουν ξεκάθαρα πως το απλοποιημένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την εκτίμηση μιας κεραυνικής εκκένωσης πάνω σε πυλώνα.

Βιβλιογραφία

Abdel-Salam, M., Turkey, A.A., Hashem, A.A. (1998). "The onset voltage of coronas on bare and coated conductors". *J.Phys.D: Appl. Phys.* 31, pp.2550-2556.

Aleksandrov, N.L., Bazelyan, E.M., Carpenter, R.B., Drabkin, M.M., Raizer, T.P. (2001). "The effect of coronae on leader initiation and development under thunder storm conditions and in long air gaps". *J. Phys. D.: Applied Physics.* Vol.34, pp.3256-3266.

Aleksandrov, N.L., Bazelyan, E.M., Raizer, T.P. (2005). "The effect of corona discharge on lightning attachment". *Plasma Phys. Rep.* 31(1), pp.75-91.

Ametani, A., Kasai, Y., Sawada, J., Mochizuki, A., Yamada, T. (1994). "Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model". *IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution.* 141(4).

Austin, A.O. (1932). "Transmission line". *US patent № 1,848,071.*

Baba, Y., Nagaoka, N., Ametani, A. (2005). "Modeling of thin wires in a lossy medium for FDTD simulations". *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 47(1), pp.54–60.

Baldwin, R. E. (1986). "Lightning protection for aircraft radomes". *US patent 4,583,702.*

Boufenneche, L., Nekhoul, B., Poljak, D., Kerroum, K., El khamlichi Drissi, K. (2010). "Interaction between lightning discharge and electrical tower". *30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy: ICPL.

Burke, G.J. (1992). *Numerical Electromagnetic Code-NEC-4*.

Carrara, G. & Thione, L. (1976). "Switching surge strength of large air gaps: a physical approach". *IEEE Trans. PAS-95*(2), pp.512-524.

Chisholm, W.A. & Anderson, J.G (2003). "Lightning and Grounding". *EPRITransmission Line Reference Book*. 3rd ed. Chapter 6.

CIGRE Study Committee 33 (1990). "Overvoltages and Insulation Coordination, WG 02 "Internal Overvoltages". *Guidelines for representation of network elements when calculating transients*.

De Oliveira, R.M.S. & Sobrinho, C.L.S.S. (2009). "Computational Environment for Simulating Lightning Strokes in a Power Substation by Finite-Difference Time-Domain Method". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Vol.51, pp 995-1000.

Eriksson, A. J. (1987). "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis". *IEEE Trans. Power Del. PWRD-2*(3), pp.871-886.

Galloway, R.H., Shorroks, W.B., Wedepohl, L.M. (1964). "Calculation of electrical parameters for short and long polyphase transmission lines". *Proceeding IEE*. Vol. 111, pp.2051-2059.

Gao, C., Li, L., Li, B., Zhao, Z. (2006). "Computation of Power Line Tower Lightning Surge Impedance Using the Electromagnetic Field Method". *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*.

Geldenhuys, H. (2005). "Performance and design of overhead LV bundle conductor systems in an environment of high lightning activity and high pollution". *CIGRE. 18th International Conference on Electricity Distribution, Session Number 1*.

Golde, R.H. (1973). *Lightning protection*. London, UK: Edward Arnold Publisher.

Gutierrez, J.A., Bermudez, J.L., Rachidi, W.F., Paolone M., Nucci, C.A., Chisholm, W.A., Moreno, P., Naredo, J.L. (2002). "A Reduced-Scale Model to Evaluate the Response of Nonuniform Towers to a Lightning Strike". *Proceedings 26th International Conference on Lightning Protection*. Krakow, Poland.

He, J., Tu, Y., Zeng, R., Lee, J.B., Chang, S.H. Guan, Z. (2005). "Numerical analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke". *IEEE Trans. Power Del.* 20(2), pp. 815-822.

Hilberg, W. (1981). *Impulse auf Leitungen*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag.

Hinrichsen, V. (2001). *Metalloxid-Ableiter, Grundlagen*. 2nd ed. Siemens AG.

IEC 28/156/DTR (IEC 60071-4, TR, Ed. 1):2002-12: "Insulation coordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks".

IEC 60071-1:2006-01: "Isolation co-ordination – Part 1:Definitions, principles and rules".

IEC 60071-2:1996-12: "Insulation co-ordination – Part 2: Application guide".

IEC 60099-5:2000-03: "Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations".

IEC 62305-1:2006-01: "Protection against lightning – Part 1: General principles".

IEC 81/335/CDV (IEC 62305-1 Edition 2.0):2009-09: "Protection against lightning – Part 1: General principles".

Kern, A., Frentzel, R., Behrens, J. (2010). "Simulation of the transient voltages in the auxiliary power network of a large power plant in case of a direct lightning strike to thw high-voltage overhead transmission line". *30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy: ICPL.

IEC Standard 99-1 (1991-05). *Non-linear resistor type gapped surge arresters for a/c systems*.

IEEE (1997). "Guide for improving the Lightning performance of Transmission Lines". *IEEE Std. 1243-1997*.

Kaouche, S., Nekhoul, B., Kerroum, K., El Khamlichi Drissi, K.(2007). "Modélisation des perturbations induites par une onde de foudre sur un réseau de puissance non linéaire par FDTD". *Revue internationale de génie électrique (RIGE)*, pp.1-38.

Leite, R.C., De Oliveira, R.M.S., Salame, Y.C., Sobrinho, C.L.S.S. (2010). "Simulation of Transmission Line Performance under Lightning Strikes using the FDTD Method". *30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy: ICPL.

Les Renardieres Group (1972). "Long air gap discharges at Les Renardieres: 1973 results". *Electra*. 23, pp.53-157.

Les Renardieres Group (1974). "Long air gap discharges at Les Renardieres: 1973 results". *Electra*. 35, pp.49-156.

Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee (2005). "Parameters of lightning strokes: A review". *IEEE Trans. Power Del.* 20(1), pp.346-358.

Lim, Y.T., Uman, M.A. *et al.* (1979). "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurement". *J. Geophys. Res.* Vol. 84, pp.6307-6314.

Lindenmeier, S. (2008).: "Electromagnetic Coupling". *Carl-Cranz-Gesellschaft e.V., Fachtagung Electromagnetic Compatibility*. Oberpfaffenhofen.

Metwally, I.A. & Heidler, F.(2004). "Induced Voltages in AC Overhead Power Lines and Shared-Corridor Pipelines during Normal Operation and Lightning Strikes". *27th International Conference on Lightning Protection*. Avignon, France: ICLP.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (2008). "Striking distance and interception probability". *IEEE Trans. Power Del.* 23(3), pp.1571-1580.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (2009a). "Interception probability and shielding against lightning". *IEEE Trans. Power Del.* 24(2), pp. 863-873.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (2009b). "Lightning attachment models and maximum shielding failure current: Application to transmission lines". *Proc. of Power Tech. Paper 233*. Bucharest, Romania.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (2010a). "Interception probability and proximity effects: Implications in shielding design against lightning". *IEEE Trans. Power Del.* 25(3), pp.1940-1951.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (2010b). "Lightning interception probability and shielding performance of overhead transmission lines". *30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy: ICPL.

Mikropoulos P. N. & Tsovilis, T. E. (n.d.). "Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: Implications in insulation coordination of substations". *IET Gener. Transm. Distrib.*

Mikropoulos, P.N., Tsovilis, T.E., Ananiadis, T. (2008). "The effect of an earthed object on the interception radius of the Franklin rod: An experimental investigation". *Proc. Of Med Power '08. Paper 77*. Thessaloniki, Greece.

Mikropoulos, P.N., Tsovilis, T.E., Zlitidis, D.E. (2010). "Software development for the evaluation of the lightning performance of overhead transmission lines." *45th UPEC*. Cardiff, Wales, UK.

Morey, C.R. & Oehne, T.C. (1908). "Lightning arresters and schemes for testing". *Thesis (B.S.)*. Armour Institute of Technology.

Paul, C.R. (1994). "Analysis of multiconductor transmission lines". USA: Wiley Interscience.

Podporkin, G.V. (2009). *High voltage insulator and overhead power line using the insulator*. PCT/RU2009/000142.

Podporkin, G.V. & Kalakutsky, E.S. (2009). *Lightning arrester and overhead power line equipped with the arrester*. PCT/RU2009/000006.

Podporkin, G.V., Enkin, E.Yu., Kalakutsky, E.S., Pilshikov, V.E., Sivaev, A. D. (2010). "Lightning protection of overhead lines by multi-chamber arresters and insulator-arresters". *30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy: ICPL.

Podporkin, G.V., Pilshikov, V.E., Sivaev, A. D. (2006). "Development of Long Flashover Arresters with Multi-Electrode System for Lightning Overvoltage and Conductor-Burn Protection of 6 to 35 kV Overhead Lines". *28th International Conference on Lightning Protection*. ICLP, pp.980-984.

Rachidi, F., Nucci, C.A., Uman, M.A., Standler, (1990). "The Modified Transmission Line lightning return stroke current models". *Journal of Geophysical Research*. 95 (D12).

Rakov, V.A. & Uman, M.A. (2003). *Lightning physics and effects*. Cambridge, U.K: Cambridge University Press.

Rizk, F.A.M. (1989). "A model for witching leader inception and breakdown of long air gaps". *IEEE Trans. PWRD-4*(1), pp.596-606.

Rizk, F.A.M. (1990). "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes". *IEEE Trans. Power Del.* 5(4), pp.1983-1997.

Rizk, F.A.M. (1994). "Modeling of lightning incidence to tall structures, Part II: Applications". *IEEE Trans. on Power Delivery.* 9(1), pp.172-193.

Rizk, F.A.M. (2010a). "Analysis of space charge generating devices for lightning protection: performance in slow varying fields". *30th International Conference on Lightning Protection.* Cagliari, Italy: ICPL.

Rizk, F.A.M. (2010b). "Effect of positive streamer inhibition on exposure of overhead conductors to direct lightning strikes". *IEEE Trans. on Power Delivery.* 25(3), pp.1996-2006.

Rizk, F.A.M. (2010c). "Exposure of overhead conductors to direct lightning strikes: Effect of positive streamer inhibition". *IEEE Trans. on Power Delivery.* Paper accepted for publication.

Rizk, F.A.M. (n.d.). "Modelling of substation shielding against direct lightning strikes". *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, in Press.*

Shao, X.M., Krehbiel, P.R., Thomas, R.J., Rison, W. (1995). "Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida". *J. Geophys. Res.* Vol.100, pp.2749-2783.

Taflove, A. & Hagness, S.C. (2000). "*Computational electrodynamics, the Finite Difference Time Domain Method*". London: Artech House Inc.

Trinh, N.G. & Jordan, J.B. (1968). "Modes of corona discharges in air". *IEEE Trans. PAS-87*(5), pp.1207-1215.

Uhlig, C.A.E. (1956). "The ultra corona discharge, a new phenomenon occurring on thin wires". *High Voltage Symposium*. National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.

Uman, M. (2008). *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge, U.K: Cambridge University Press.

Uman, M.A., Kenneth McLain, D., Philipp Krider, E. (1975). "The Electromagnetic radiation from finite antenna". *American Journal Physics*. 43(33), pp.33-38.

Vahidi, B., Yahyaabadi, M., Tavakoli, M.R.B., Ahadi, S.M. (2008). "Leader progression analysis model for shielding failure computation by using the charge simulation method". *IEEE Trans. Power Del.* 23(4), pp.2201-2206.

Whitehead, E.R. (1974). "CIGRE survey of the lightning performance of EHV transmission lines". *Electra*. 33, pp.63-89.

Yee, K. (1966). "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. Vol. 14, pp 302-307.

www.eng.auth.gr/hvl/