



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαριτωμένη Γ. Μαρκαντωνάκη

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπουσα : Φανή Η. Ασημακοπούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

157

Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαριτωμένη Γ. Μαρκαντωνάκη

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1^η Ιουλίου 2010.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κων/νος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
Χαριτωμένη Γ. Μαρκαντωνάκη
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χαριτωμένη Γ. Μαρκαντωνάκη
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

“ Η επαφή με το μυστήριο είναι η ωραιότερη εμπειρία του ανθρώπου.
Είναι η πηγή της αληθινής τέχνης και επιστήμης. ”

Albert Einstein

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους σε συστήματα γείωσης. Αρχικά εισάγονται και αναλύονται έννοιες, όπως η γείωση και τα είδη της, και περιγράφονται τα μοντέλα που έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η μεταβατική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, και τα προτεινόμενα ισοδύναμα κυκλώματα του ιονισμού του εδάφους, τα οποία προσομοιώνονται στο πρόγραμμα PSCAD/EMTDC.

Τέλος, στην εργασία αυτή περιγράφονται τα δεδομένα από μια σειρά μετρήσεων στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοίωση.

Λέξεις κλειδιά

Σύστημα γείωσης, ηλεκτρόδιο γείωσης, ιονισμός του εδάφους, κυκλωματική προσέγγιση, πρόγραμμα προσομοίωσης PSCAD/EMTDC, ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

Abstract

The aim of this diploma thesis is the circuit simulation of soil ionization process in grounding systems. In the beginning, concepts such as grounding and its types are introduced and the models that have been proposed for the study of soil ionization are described. Moreover, the transient behavior of the grounding electrode, when ionization process takes place, is presented. The proposed equivalent circuits of soil ionization, which are simulated by PSCAD/EMTDC software package, are developed.

Finally, results from test experiments at the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens are described and comparisons between these results and simulation outcomes are described.

Key words

Grounding system, ground electrode, soil ionization, circuit simulation, PSCAD/EMTDC software package, equivalent circuit of soil ionization

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Μαρκαντωνάκη Χαριτωμένης για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους σε συστήματα γείωσης. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν στο πρόγραμμα PSCAD/EMTDC προσομοιώσεις διαφόρων κυκλωματικών ισοδυνάμων του ιονισμού, που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας εισάγεται η έννοια της γείωσης και ορίζονται κάποια συναφή μεγέθη, τα οποία κρίθηκαν απαραίτητα για την καλύτερη κατανόηση της. Εν συνεχεία, γίνεται αναφορά στην ειδική αντίσταση του εδάφους, και στις παραμέτρους από τις οποίες επηρεάζεται η τιμή της. Κατόπιν παρουσιάζονται οι μηχανισμοί, οι οποίοι προκαλούν διάσπαση του εδάφους και έχουν προταθεί μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται αναλυτικά η μεταβατική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η πειραματική διάταξη και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται το πρόβλημα της κυκλωματικής προσέγγισης του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους, όπως προτάθηκε από μελετητές, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του φαινομένου και στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, όσον αφορά στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και κατόπιν γίνεται σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ίδιου κυκλώματος.

Στο **Κεφάλαιο 6** σύμφωνα με την κατεύθυνση έρευνας που ανακύπτει μέσα από την παρούσα εργασία αναφέρεται το επόμενο βήμα από αυτήν για μελλοντική διερεύνηση.

Στο **Παράρτημα Α** παρατίθενται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας.

Στο **Παράρτημα Β** δίνονται γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα προσομοίωσης PSCAD/EMTDC που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση όλων των κυκλωμάτων της παρούσας εργασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και ειδικότερα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για τις άριστες συνθήκες που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Την Κυρία Φανή Η. Ασημακοπούλου, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή της, για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας καθώς και για το φιλικό και ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε, και επιπρόσθετα να της ευχηθώ καλή πορεία στην ακαδημαϊκή της καριέρα.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και τον κ. Παύλο Σ. Κατσιβέλη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφεραν τη βοήθεια τους και τις γνώσεις τους πάνω σε θέματα που αφορούσαν στη διπλωματική μου εργασία.

Όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, γιατί ακόμα και όσοι δε χρειάστηκε να βοηθήσουν στην παρούσα εργασία συνέβαλλαν στην επιτυχία της εκπόνηση με το ζεστό κλίμα που δημιουργούσαν στο χώρο του Εργαστηρίου.

Τέλος, ένα μεγάλο και ξεχωριστό ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την υποστήριξη και τον τρόπο με τον οποίο ήταν πάντα δίπλα μου όλα τα προηγούμενα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Πρόλογος.....	iii
Περιεχόμενα.....	vi
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στον ιονισμό του εδάφους	
1.1 Ο ρόλος της γείωσης.....	1
1.2 Είδη γείωσης.....	2
1.3 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	3
1.4 Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους.....	6
1.5 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους.....	7
1.5.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων.....	8
1.5.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	11
1.5.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας.....	18
Κεφάλαιο 2 Ιονισμός – Συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης	
2.1 Ορισμός.....	24
2.2 Συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης όταν εκδηλώνεται φαινόμενο ιονισμού..	24
2.2.1 Κρουστική σύνθετη αντίσταση.....	24
2.2.2 Κρουστική Συμπεριφορά Ηλεκτροδίου Γείωσης.....	26
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη – Πειραματική διαδικασία	
3.1 Εξοπλισμός.....	42
3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	42
3.2.1 Λύσιμη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας.....	43
3.2.2 Τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616.....	45
3.2.3 Μηχανισμός μεταβολής αποστάσεως σφαιρών.....	46
3.2.4 Σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW.....	46
3.2.5 Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner WS-30.....	47
3.2.6 Αμπεροτσιμπίδα Pearson.....	48
3.2.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052.....	48
3.2.8 Θερμόμετρο - Υγρόμετρο.....	49
3.2.9 Ομοαξονικά καλώδια.....	50
3.3 Μετρήσεις.....	50

3.3.1 Προετοιμασία χώματος.....	50
3.3.2 Δοκίμιο.....	51
Κεφάλαιο 4 Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους	
4.1 Περιγραφή του κυκλώματος - Αποτελέσματα.....	52
4.1.1 Κυκλωματικό μοντέλο.....	52
4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης - Παρατηρήσεις.....	54
4.1.3 Βελτιωμένο κυκλωματικό μοντέλο.....	56
4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης βελτιωμένου κυκλωματικού μοντέλου - Παρατηρήσεις.....	58
4.2 Γενικές παρατηρήσεις - Σχόλια.....	60
Κεφάλαιο 5 Πειραματικά δεδομένα – Κυκλωματική προσομοίωση	
5.1 Ανάλυση των τιμών των αντιστάσεων R_1 και R_2	64
5.2 Περιγραφή του κυκλώματος.....	68
5.2.1 Κυκλωματικό μοντέλο.....	68
5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης – Παρατηρήσεις.....	70
Κεφάλαιο 6 Η επόμενη μέρα	
6.1 Σύνοψη – Μελλοντική διερεύνηση.....	75
Βιβλιογραφία	
Παράρτημα Α Παλμογραφήματα	
A.1 Παρουσίαση παλμογραφημάτων	
A.1.1 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 5% και θετική πολικότητα	
Παράρτημα Β Εισαγωγή στο PSCAD/EMTDC	
B.1 Εισαγωγή	
B.2 Τι είναι το PSCAD/EMTDC	
B.3 Αρχή λειτουργίας	
B.4 Δυνατότητες	
B.5 Εφαρμογές	
B.6 Βιβλιογραφία παραρτήματος	

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στον ιονισμό του εδάφους

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στο ρόλο που επιτελεί ένα σύστημα γείωσης, στα διάφορα είδη γείωσης και δίδονται κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά στην ειδική αντίσταση του εδάφους, δίδεται ο ορισμός της, καθώς και οι παράμετροι από τις οποίες επηρεάζεται η τιμή της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μηχανισμοί, οι οποίοι προκαλούν διάσπαση του εδάφους και γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μέχρι σήμερα προταθέντων μοντέλων.

1.1 Ο ρόλος της γείωσης – Χρήσιμοι ορισμοί

Είναι γνωστό ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης επικινδύνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα: [1]

1. Προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.
2. Προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων.
3. Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

Ακολουθούν χρήσιμοι ορισμοί μεγεθών:

Γείωση είναι η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους, που να θεωρείται γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγώγιμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται με αυτό.

Βηματική τάση είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω βηματισμού.

Τάση επαφής είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός γειωμένου μεταλλικού ικριώματος και ενός σημείου της επιφάνειας της γης σε οριζόντια απόσταση 1m .

Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής είναι ένας αγωγός εμπηγμένος στη γη, ο οποίος διαχέει το ρεύμα στη γη.

Αντίσταση γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R = \frac{V}{I}$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου.

Η αντίσταση γείωσης, την οποία μετράμε σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό, είναι επιθυμητό το μεγάλο μέγεθος των συστημάτων γείωσης και το υλικό των ηλεκτροδίων είναι κατά κανόνα χαλκός επικασιτερωμένος ή γαλβανισμένος χάλυβας, για την αποφυγή οξείδωσης.

1.2 Είδη γείωσης

Οι γείώσεις ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη:

Γείωση λειτουργίας: Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους, ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Αυτή διακρίνεται σε:

- Άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.
- Έμμεση, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Γείωση προστασίας: Καλείται η γείωση κάθε αγωγίμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγωγή μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής τα οποία δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.

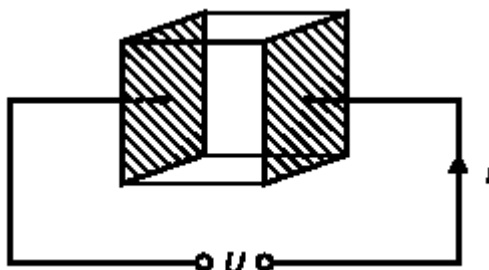
Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας: Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων, των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας αντικεραυνικής προστασίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη.

1.3 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύσταση του εδάφους. Υπάρχει ποικιλία εδαφών: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή

αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ , η οποία μετράται συνήθως σε Ωm . Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.1*.



Σχήμα 1.1 Ειδική αντίσταση του εδάφους.

Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη περιγραφή των παραγόντων, που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση [2]:

i. Ο τύπος του εδάφους

Ο τύπος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Δυστυχώς δεν έχουν ορισθεί καθαρά οι τύποι του εδάφους, για παράδειγμα, με τη λέξη άργιλος μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πίνακες στους οποίους παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

ii. Επίδραση μεγέθους κόκκων

Το μέγεθος των κόκκων αλλά και η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο είναι μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης.

Επίσης, το μέγεθος των κόκκων αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία.

iii. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και η ποσότητα των διαλυμένων αλάτων παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η ακριβής περιεκτικότητα σε νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι μεταβλητή ποσότητα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πίνακες στους οποίους καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης, συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

iv. Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, όπως είδαμε παραπάνω, επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Το νερό όμως περιέχει και διαλυμένα σε αυτό άλατα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό, που έχει προστεθεί στο χώμα, είναι απιονισμένο. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πίνακες στους οποίους παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα.

v. Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης

Εφόσον η ειδική αντίσταση του εδάφους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του νερού και είναι γνωστό ότι η ειδική αντίσταση του νερού έχει μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή, είναι αναμενόμενο ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία θα μειώνεται. Σε περίπτωση μάλιστα, που η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0° C τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ.

Όσον αφορά στην επίδραση της πίεσης, έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε πιο συμπαγείς δομές του εδάφους, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Η μικρή ποσότητα διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων όμως δεν υποστηρίζει πλήρως αυτήν τη θεωρία και είναι πιθανό από πρακτική άποψη η επίδραση της πίεσης να μπορεί να αμεληθεί.

1.4 Μηχανισμοί Διάσπασης του Εδάφους

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα, ή αέρας. Στο νερό και τα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρόλο, που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί [3] και η συμπεριφορά τους είναι πλήρως κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος), τότε μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστός. Ωστόσο έχουν καταβληθεί προσπάθειες από πλήθος ερευνητών για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε μεταβατικά φαινόμενα και την περιγραφή των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα. [3]

Μέχρι σήμερα δύο είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του μηχανισμού διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο θερμικός μηχανισμός και ο άλλος είναι ο ιονισμός του εδάφους.

Σύμφωνα με το **θερμικό μηχανισμό**, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [4], όταν το ρεύμα εγχέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το

ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους. Ο χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο **ιονισμός του εδάφους** και προτάθηκε από τους Leadon et al [5]. Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων.

Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle [6], [7], Petropoulos [8] και Liew et al. [9] υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι ο θερμικός μηχανισμός βασίζεται σε απλουστευτικές θεωρήσεις.

Σύμφωνα με τους Nor και Ramli [10] για να καταστεί δυνατή η διάκριση μεταξύ των δύο μηχανισμών είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ενέργειας, που απορροφάται από το χώμα, για δεδομένη επιβαλλόμενη τάση και περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Φυσικά, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε ό,τι αφορά στους μηχανισμούς διάσπασης.

1.5 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους

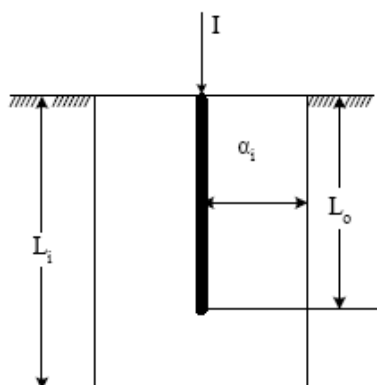
Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

1.5.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Οι Bellaschi et al. [11] και ο Πετρόπουλος [8] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων.

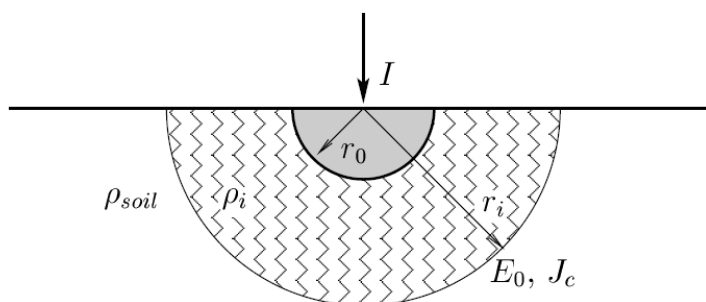
Αναλυτικότερα, ο Bellaschi σε εργασία του [11] συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μόνιμη κατάσταση με τη συμπεριφορά τους σε μεταβατική κατάσταση. Για το σκοπό αυτό διεξήγαγε πειράματα τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου, υπολόγισε τους λόγους της κρουστικής αντίστασης προς την τιμή της αντίστασης γείωσης μόνιμου καταστάσεως και παρατήρησε τη μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης όσο το επιβαλλόμενο κρουστικό ρεύμα αυξανόταν. Αυτό αποδόθηκε στη βραχυκύκλωση μέσω τόξων της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγώγιμων συστατικών του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, καθώς η εφαρμοζόμενη στο ηλεκτρόδιο γείωσης τάση αυξάνεται, η τιμή της αντίστασης του παραμένει σταθερή, μέχρις ότου η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε εμφανίζονται εκκενώσεις και η αντίσταση μειώνεται.

Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [12] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Στο **Σχήμα 1.2** παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και κατ' επέκταση τη μείωση της αντίστασης.



Σχήμα 1.2 Μοντέλο Bellaschi.

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος σε άρθρο του [8] αναφέρει ότι η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η αντίσταση των συνηθισμένων γειώσεων μειώνεται κατά το 1/5 περίπου υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων της τάξης των 10kA. Σε περιπτώσεις όπου άλλα αγωγιμα σώματα υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγιμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από άνθρακα γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε το σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης ένα συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης. Στο **Σχήμα 1**, φαίνεται το μοντέλο των εκκενώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



Σχήμα 1.3 Μοντέλο Πετρόπουλου.

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (1.1)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση μονίμου καταστάσεως σε Ω

r_0 είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Όταν επιβάλλεται κεραυνικό ρεύμα στο ηλεκτρόδιο τότε η πυκνότητα ρεύματος σε συγκεκριμένη ακτίνα από το ηλεκτρόδιο δίδεται από τον τύπο:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.2)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

I είναι το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

r είναι η απόσταση από το ηλεκτρόδιο σε m

Το φαινόμενο του ιονισμού εκδηλώνεται όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_{soil}} \quad (1.3)$$

όπου J_c είναι η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

E_c είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε V/m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3) μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_c}} \quad (1.4)$$

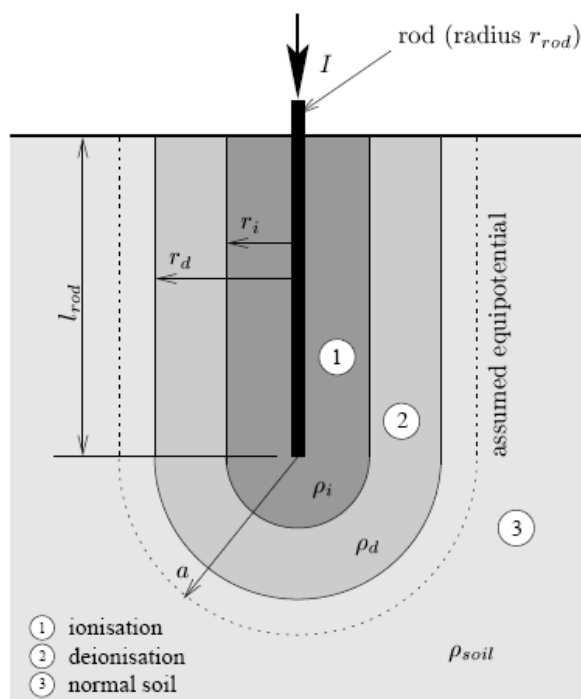
Βέβαια η ομοιομορφία του χώρου εκκενώσεων προϋποθέτει την ομοιογένεια του εδάφους, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη. Ωστόσο, η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης αποδίδεται και σε άλλους παράγοντες, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια, αφού μείωση της αντίστασης γείωσης παρατηρείται και όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σχετικά μικρή, ώστε να μη συμβαίνουν εκκενώσεις.

Τέλος, σύμφωνα με τις έρευνες των Loboda et al [13], όταν ένα ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα τότε στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκενώσεων. Στη ζώνη αυτή, αρχικά, εκδηλώνονται σπινθήρες και καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, δημιουργούνται τόξα. Στην περιοχή που εκδηλώνονται τα τόξα η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόδιο μαζί με τη γύρω απ' αυτό περιοχή ισοδυναμούν με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων (κυρίως αυξημένης διαμέτρου). Η ζώνη των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι εκείνη την περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν προκαλεί διάσπαση του εδάφους.

1.5.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ_{soil}) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού.

Το 1974 οι Liew και Darveniza [9] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ιστροπικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το μοντέλο τους το έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.4** διακρίνονται τρεις περιοχές: (1) η περιοχή ιονισμού, (2) η περιοχή απιονισμού και (3) η περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού.



Σχήμα 1.4 Μοντέλο Liew και Darveniza.

Αναλυτικότερα, καθώς το επιβαλλόμενο στο ηλεκτρόδιο ρεύμα αυξάνεται και εγγέεται στο έδαφος, η ειδική αντίσταση στις περιοχές, στις οποίες η πυκνότητα ρεύματος (J) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή (J_c), θα παρουσιάζει μια τιμή μικρότερη από την τιμή της ειδικής αντίστασης μόνιμου καταστάσεως (ρ_{soil}). Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{soil} \quad \text{για } J < J_c & (\alpha) \\ \rho &= \rho_{soil} e^{-t/\tau_1} \quad \text{για } J \geq J_c & (\beta) \end{aligned} \quad (1.5)$$

όπου τ_1 είναι η χρονική σταθερά ιονισμού κατά την αύξηση του ρεύματος

t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του ιονισμού

Ο ιονισμός θα επεκταθεί σε μια περιοχή με ακτίνα r_{cm} η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που θα πάρει το ρεύμα.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται, θα διαμορφωθούν στο έδαφος τρεις περιοχές.

Η περιοχή 3 στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και μπορούμε να γράψουμε:

$$\rho = \rho_{soil} \text{ για } r > r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (1.6)$$

Η περιοχή 2 στην οποία η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_i + (\rho_{soil} - \rho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) \left(1 - \frac{J}{J_c} \right)^2 \text{ για } r < r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (1.7)$$

όπου

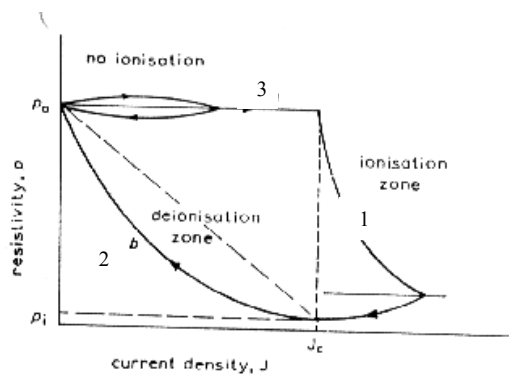
ρ_i είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος (J) είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος (J_c)

τ_2 είναι η χρονική σταθερά απιονισμού

t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του απιονισμού

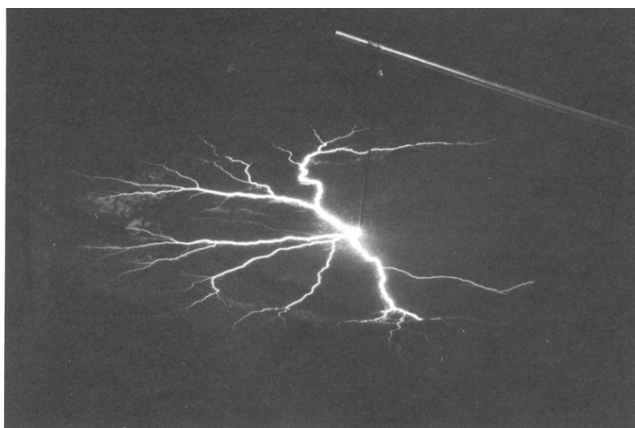
Στην περιοχή 1 για την οποία ισχύουν $r < r_{cm}$ και $J \geq J_c$. εξακολουθούν να εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού και η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σύμφωνα με την (1.7). Η διαδικασία αυτή θα σταματήσει όταν η πυκνότητα ρεύματος J θα πάρει τιμές μικρότερες από J_c , οπότε θα αρχίσει η διαδικασία του απιονισμού.

Το παρακάτω **Σχήμα 1**. δείχνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης καθώς το εγγεόμενο ρεύμα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.

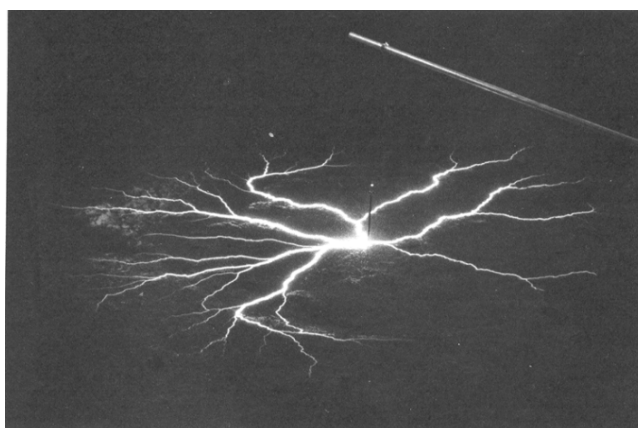


Σχήμα 1.5 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος.

Κατά τη δεκαετία του '90 διενεργήθηκαν πειράματα στη Φλόριδα και την Αλαμπάμα [46] στα οποία καταγράφηκαν μέσω φωτογραφιών ακτινωτά νηματοειδή τόξα κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους με κέντρο το σημείο της εκφόρτισης (*Εικόνες 1.1 και 1.2*).



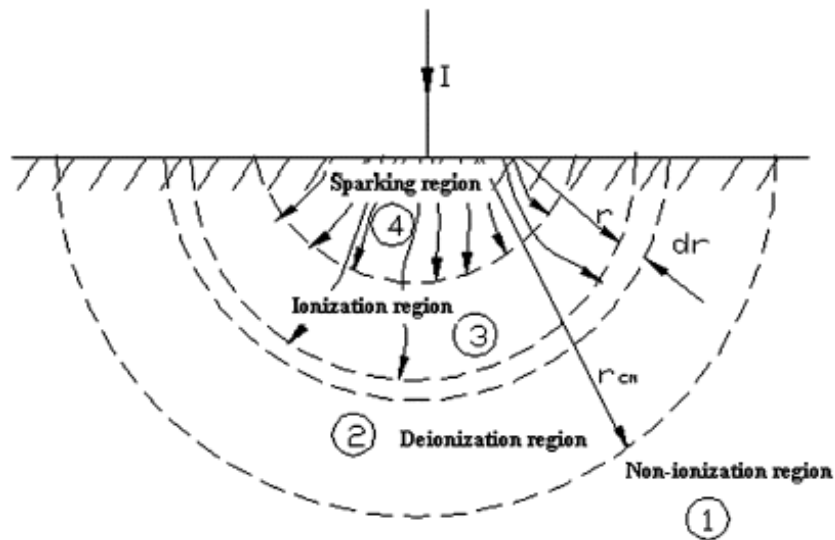
Εικόνα 1.1 Επιφανειακές εκκενώσεις.



Εικόνα 1.2 Επιφανειακές εκκενώσεις.

Από πειραματικά αποτελέσματα αλλά και αναλύσεις οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι η διαδικασία της διάσπασης οδηγεί στη διαμόρφωση διακριτών τόξων τόσο μέσα στο έδαφος όσο και στην επιφάνειά του και είναι πιθανόν αυτά τα δύο φαινόμενα να οδηγούν στη μείωση της αντίστασης γείωσης. Ο Song, κατόπιν διεξαγωγής πειραμάτων, τόσο σε εργαστηριακό όσο και σε εξωτερικό χώρο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και από το μηχανισμό διάσπασης [14]. Επίσης, διεξήγαγε πειράματα με σκοπό τον καθορισμό των παραγόντων, που δημιουργούν διακριτά μονοπάτια διάσπασης ώστε να καταστεί δυνατή η

επαλήθευση ενός μοντέλου ικανού να περιγράψει τη μεταβατική συμπεριφορά του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κεραυνικών ρευμάτων. Βάσει των αποτελεσμάτων των νέων μελετών, οι J. Wang, A.C. Liew και M. Darveniza σε εργασία τους το 2005 [15] επέκτειναν το μοντέλο του 1974, εισάγοντας και την περιοχή όπου εκδηλώνονται τόξα. Χάριν απλότητας θεώρησαν ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας το στοιχειώδη ημισφαιρικά κελύφη πλάτους dr . Στο **Σχήμα 1.6** παρουσιάζεται το ημισφαιρικό μοντέλο, γνωστό και ως μοντέλο Wang – Liew – Darveniza.



Σχήμα 1.6 Μοντέλο Wang: (1) μη ιονισμένη περιοχή, (2) περιοχή απιονισμού, (3) περιοχή ιονισμού, (4) περιοχή τόξων

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβάλλεται ως εξής: όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή $J < J_c$ δεν εκδηλώνονται τόξα στο έδαφος και η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή και ίση με ρ_{soil} .

Όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί την κρίσιμη τιμή τότε μπορούν να θεωρηθούν δυο περιοχές: μία περιοχή, στην οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός του εδάφους ($r < r_{cm}$ (κρίσιμη απόσταση) και $J \leq J_c < J_s$) και η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο (1.5) (β), και μία περιοχή σπινθηρισμού ($r < r_{cm}$ και $J \geq J_s$),

στην οποία η ειδική αντίσταση εδάφους μηδενίζεται. Παρουσιάζεται επομένως, η ανάγκη εισαγωγής μίας νέας σταθεράς, η οποία συσχετίζει την J_s με την J_c , όπου J_s είναι η πυκνότητα ρεύματος πάνω από την οποία εκδηλώνονται τόξα. Η σταθερά a ορίζεται ως εξής:

i) Καθώς το ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η σταθερά μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο (1.8):

$$a = a_0(1 - \lambda e^{I^{\beta_1}}) \quad (1.8)$$

όπου I είναι το εγχεόμενο ρεύμα, a_0 είναι η αρχική τιμή του a , ο όρος β_1 περιλαμβάνεται στην ενεργειακή θεώρηση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του J_s τόσο πιο έντονα θα είναι τα τόξα και θα εκδηλώνονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Με άλλα λόγια όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του εγχεόμενου ρεύματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η περιοχή εμφάνισης τόξων. Η σταθερά λ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της χρονικής στιγμής που το a θα αρχίσει να μειώνεται.

Η παραπάνω συνθήκη (1.8) εφαρμόζεται μόνο για $a > 1$. Καθώς το a μειώνεται λόγω των τόξων και του ιονισμού, εκδηλώνονται τόξα και στην επιφάνεια του εδάφους. Για την περιγραφή αυτής της κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι:

$$\begin{aligned} a &= 1 + (e^{1/I})^{\beta_2} & (\alpha) \\ \beta_2 &= I(t - \Delta t) \ln(a_s - 1) & (\beta) \end{aligned} \quad (1.9)$$

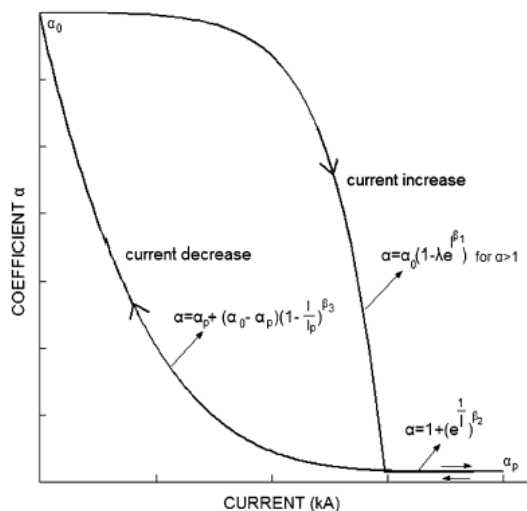
με $a_s > 1$ και είναι η ελάχιστη τιμή που υπολογίζεται από τον (1.9(α)).

ii) Καθώς το ρεύμα μειώνεται από τη μέγιστη τιμή του, το a ανακτά την αρχική τιμή του σύμφωνα με τον τύπο:

$$a = a_p + (a_0 - a_p) \left(1 - \frac{I}{I_p} \right)^{\beta_3} \quad (1.10)$$

όπου a_p είναι η τιμή του a που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα I_p και β_3 είναι μια σταθερά προς προσδιορισμό. Η τιμή του β_3 μεταβάλλεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος τόσο πιο αργά το a θα ανακτήσει την αρχική του τιμή (a_0).

Στο **Σχήμα 1.7** παρουσιάζεται η συμπεριφορά του α καθώς το ρεύμα μεταβάλλεται.



Σχήμα 1.7 Η μεταβολή του συντελεστή α καθώς μεταβάλλεται το εγγεόμενο ρεύμα.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται, μπορούν να θεωρηθούν 4 περιοχές:

Η περιοχή 1, όπου $r > r_{cm}$ και $J < J_c$, στην οποία το έδαφος δεν ιονίστηκε καθόλου και επομένως η τιμή της ειδικής αντίστασης παρέμεινε σταθερή (ρ_{soil}).

Η περιοχή 2, όπου $r < r_{cm}$ και $J < J_c$. Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η τιμή της ειδικής αντίστασης ανακτά την αρχική τιμή της σύμφωνα με τον τύπο (1.7).

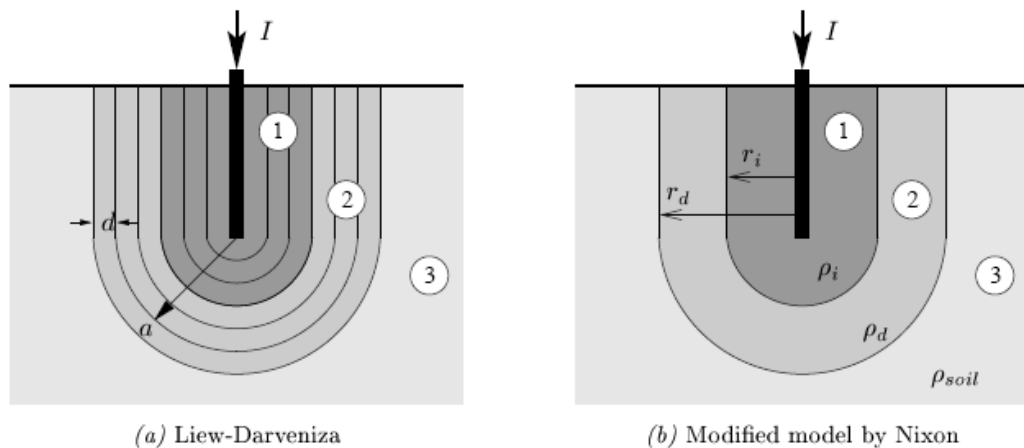
Η περιοχή 3, όπου $r < r_{cm}$ και $J_s > J \geq J_c$. Σε αυτήν την περιοχή θα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ο ιονισμός μέχρι τη στιγμή που $J = J_c$ οπότε και θα ξεκινήσει η διαδικασία απιονισμού.

Η περιοχή 4, όπου $r < r_{cm}$ και $J \geq J_s$ στην οποία εμφανίζονται τόξα και η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μηδενική.

Μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η εισαγωγή και άλλων παραμέτρων, που θα πρέπει να προσδιοριστούν, καθιστώντας το δύσχρηστο.

Το 2006 ο K.J. Nixon [16] πρότεινε μία απλοποίηση του μοντέλου των Liew – Darveniza (1974). Το μοντέλο των Liew - Darveniza υπέθετε ότι η ζώνη ιονισμού (απιονισμού αντίστοιχα) αποτελείται από στοιχειώδη κελύφη, στα

οποία η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή, και συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε κελύφους. Ο Nixon εκτίμησε ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) μπορεί να θεωρηθεί ίδια σε όλο τον όγκο της ζώνης και μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο εξωτερικό όριο της ζώνης. Στο *Σχήμα 1*, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza και του μοντέλου που πρότεινε ο Nixon.



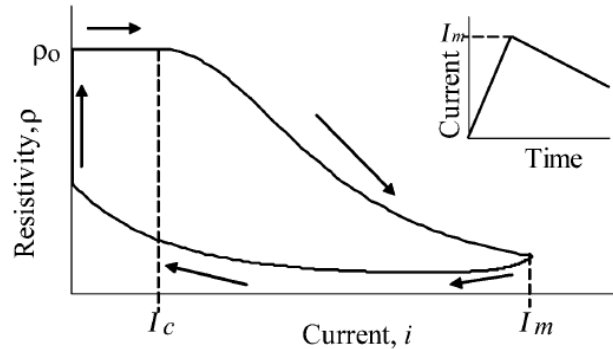
Σχήμα 1.8 Διαφορές μεταξύ του μοντέλου των Liew – Darveniza και του μοντέλου του Nixon (1) Περιοχή ιονισμού, (2) Περιοχή απιονισμού, (3) Περιοχή όπου δεν έχει λάβει χώρα ο ιονισμός.

Όπως προέκυψε από συγκρίσεις που έκανε ο Nixon με το μοντέλο των Liew και Darveniza αλλά και με πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο του είναι αρκετά ακριβές.

1.5.3 Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekiooka et al [17]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας, εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα. Ο Hayashi [18] περιγράφει την ανάπτυξη των ζωνών ιονισμού και αντιστοιχεί τα χαρακτηριστικά τους με αυτά της διάσπασης στον αέρα. Στην εργασία επιβεβαιώνεται η ομοιότητα μεταξύ του ιονισμού του εδάφους και της διάσπασης του ιονισμένου αέρα. Συνεπώς, ο ιονισμός του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος

εκφόρτισης και μπορεί να παρομοιαστεί με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στο εσωτερικό των διακοπών. Έτσι, η αποκτηθείσα εμπειρία στη μοντελοποίηση των τόξων σε διακόπτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού στο έδαφος και τον προσδιορισμό της ζώνης ιονισμού. Στο **Σχήμα 1**, παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους.



Σχήμα 1.9 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος.

Με βάση την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την εξίσωση του Mayr [19] προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση (1.11):

$$\frac{1}{Q} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{Q_0} (ui - P) \xrightarrow{\frac{ui-P}{Q_0} = a, \text{ σταθερά}} Q = Q_0 \exp(-at) \quad (1.11)$$

όπου u είναι η τάση εκφόρτισης

i είναι το ρεύμα εκφόρτισης

Q είναι η αποθηκευμένη ενέργεια

P είναι οι απώλειες ισχύος

$Q = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$ είναι η αγωγιμότητα του τόξου (Sm)

t είναι ο χρόνος

K (Sm) και Q_0 (J/m) είναι σταθερές.

Η απώλεια ισχύος οφείλεται στην απώλεια θερμότητας, και γι' αυτόν τον λόγο θα πρέπει να θεωρηθεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν μάλιστα ότι, η θερμοκρασία στην περιοχή του ιονισμού μειώνεται, καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο, η απώλεια θερμότητας μπορεί να φθάνει και έξω από την περιοχή ιονισμού. Αυτό οδηγεί στην απώλεια

ισχύος. Έτσι λοιπόν, η απώλεια ενέργειας στο προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς την επιφάνεια κάθε τμήματος σύμφωνα με το μοντέλο του Cassie [20] για το τόξο και να περιγραφεί από την εξίσωση

$$P = \lambda S \quad (1.12)$$

όπου λ (W/m^3) σταθερά.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ όταν το εγχεόμενο ρεύμα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή I_c αρχίζει να μειώνεται. Ωστόσο, μετά τη μείωση του ρεύματος η ειδική αντίσταση δεν αρχίζει να αυξάνεται άμεσα, αλλά παρουσιάζεται μία υστέρηση λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας $E_n - N$, όπου $E_n = \int u i dt$ (1.13) (J/m) και $N = \int p dt$ (1.14) (J/m), που εξακολουθεί να είναι αποθηκευμένη σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος. Η ειδική αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται για να ανακτήσει την αρχική τιμή της κατά τον απιονισμό του εδάφους όταν $u i < P$.

Θεωρώντας $i = g u$ η γενική έκφραση του προτεινόμενου μοντέλου είναι:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[1 + \frac{1}{g_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \right]^{-1} \quad (1.15)$$

όπου ο χρόνος t είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει ιονισμός σε ένα στοιχειώδες κέλυφος και $\tau = Q_0 / P$ μια χρονική σταθερά που εκφράζει την επαναφορά της τιμής της ειδικής αντίστασης στην αρχική της τιμή (ρ_0).

Συγκρίνοντας τις προτεινόμενες εξισώσεις με αυτές των Liew και Darveniza παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.5β) για τη φάση του ιονισμού είναι ίδια με αυτήν των Liew και Darveniza ενώ για τη φάση του απιονισμού οι εξισώσεις διαφοροποιούνται. Η σταθερά χρόνου για τη φάση του απιονισμού είναι:

$$\tau_d = \begin{cases} \tau [-\ln k - (1-k)] \approx \tau \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(1-k)^n}{n} & \text{προτεινόμενο μοντέλο} \\ \tau_2 (1-k) & \text{μοντέλο Liew-Darveniza} \end{cases} \quad (1.16)$$

όπου $k = \rho_i / \rho_0$.

Για τιμές του k πολύ μικρότερες της μονάδας, παρατηρούμε ότι η σταθερά χρόνου απιονισμού των Liew και Darveniza είναι μερικές φορές μεγαλύτερη από

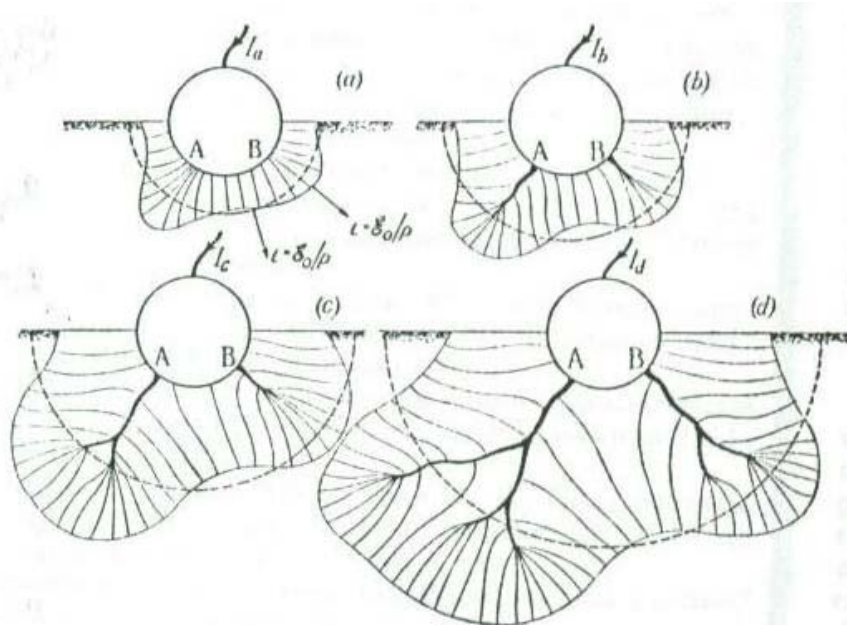
τη σταθερά του προτεινόμενου μοντέλου για την ίδια τιμή του τ_d . Επομένως, η μεταβολή της ειδικής αντίστασης κατά τη φάση του απιονισμού βάσει του μοντέλου των Liew και Darveniza, θεωρώντας μεγαλύτερη τιμή σταθεράς απιονισμού, είναι ίδια με αυτή του προτεινόμενου μοντέλου. Πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι δίδεται φυσική σημασία στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της αντίστασης γείωσης, εξαιτίας του ιονισμού και του απιονισμού του εδάφους.

Τέλος, οι Cooray et al. [21] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπ' όψιν τη δημιουργία ιονισμένων οχετών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα. Φυσικά, όπως σε κάθε μοντέλο έτσι και στο συγκεκριμένο, οι συγγραφείς υιοθέτησαν κάποιες προσεγγίσεις για λόγους απλότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα παραπάνω μοντέλα έχει γίνει η υπόθεση ότι η ζώνη ιονισμού κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Όπως πρώτος είχε παρατηρήσει ο Πετρόπουλος [8] και στη συνέχεια επιβεβαίωσαν με πειράματα οι Erler [4] και Oettle [22], η εκκένωση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ του ηλεκτροδίου και της οριακής επιφάνειας, όπου εκδηλώνονται εκκενώσεις, διότι η ομοιομορφία της εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο προϋποθέτει ομοιομορφία του χώματος. Συνεπώς, η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου δεν είναι ομοιόμορφη αλλά υπάρχουν σημεία, όπως τα A και B στο **Σχήμα 1.**, όπου η πυκνότητα του ρεύματος θα παρουσιάζει μέγιστο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της διαχωρίζουσας επιφάνειας, η οποία θα πάρει μια μορφή παρόμοια με αυτή που υποδεικνύει η συνεχής γραμμή του **Σχήματος 1.10**. Η πεδιακή ένταση θα είναι κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο περιοχών και ίση με E_c . Για δεδομένο ρεύμα I , η παραμορφωμένη διαχωρίζουσα επιφάνεια θα έχει το ίδιο εμβαδόν

όπως με αυτό της αντίστοιχης ημισφαιρικής επιφάνειας, που υπολογίσθηκε από τη θεωρία.

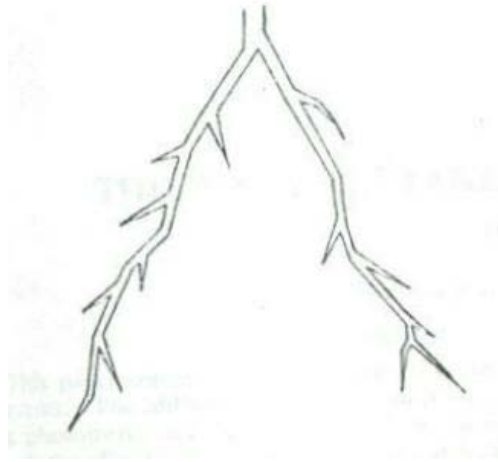
Αυξάνοντας το ρεύμα, θα αυξηθεί και η πυκνότητα του ρεύματος στα σημεία A και B. Όταν υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του χώματος και του ηλεκτροδίου, φαινόμενα θερμικού ιονισμού θα δώσουν στην εκκένωση στην περιοχή αυτών των σημείων το χαρακτήρα ενός τόξου, με πολύ μεγαλύτερη αγωγιμότητα από αυτήν του υπολοίπου χώρου εκκένωσης. Πιθανόν, οχετοί όπως εκείνοι, που απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.(b)** θα προέρχονται τότε από τα εξεταζόμενα σημεία. Αυτοί οι οχετοί θα επεκταθούν, για ένα δεδομένο ρεύμα, μέχρι η πυκνότητα του ρεύματος στα άκρα τους πέσει στην κρίσιμη τιμή I_a . Με διαδοχικά μεγαλύτερες τιμές ρεύματος I_c και I_d , οι οχετοί θα πάρουν διαστάσεις και σχήματα παρόμοια με αυτά των **Σχημάτων 1.10(c)** και **(d)**. Στον υπόλοιπο χώρο εκκένωσης χωρικές εκκενώσεις θα εξακολουθούν να υπάρχουν. Ίχνη από οχετούς, που έχουν το σχήμα εκείνων του **Σχήματος 1.10(b)**, παρατηρήθηκαν από τον Berger [23] σε άμμο γύρω από ένα σφαιρικό ηλεκτρόδιο γης, εκτεθειμένο σε υψηλές κρουστικές τάσεις.



Σχήμα 1.10 Φαινόμενα τόξου στο χώμα.

Με συνεχή πλήγματα στο έδαφος, όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια κεραυνικών εκκενώσεων, η πυκνότητα του ρεύματος στο σημείο που χτυπήθηκε είναι τόσο μεγάλη που η εκκένωση στο χώμα σχηματίζει έναν οχετό. Λόγω των υψηλών

εντάσεων του ρεύματος, αυτοί οι οχετοί όταν περνούν μέσα από άμμο, τη λιώνουν, αφήνοντας σαν ίχνος τούς γνωστούς κεραυνίτες. Ένα παράδειγμα κεραυνίτη απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.11**, που δικαιολογεί τη μορφή των οχετών εκκένωσης, όπως φαίνονται στο **Σχήμα 1.10**.



Σχήμα 1.11 Ένας κεραυνίτης

Κεφάλαιο 2

Ιονισμός – Συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης

Στο παρόν κεφάλαιο δίδεται ο ορισμός του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβατική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού.

2.1 Ορισμός

Όπως ορίστηκε στο **Κεφάλαιο 1**, ο ιονισμός του εδάφους [1] είναι μία διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η πυκνότητα ρεύματος, που εγχέεται από το σύστημα γείωσης στο έδαφος, είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει μία ένταση ηλεκτρικού πεδίου αρκετά υψηλότερη από μια κρίσιμη τιμή E_c . Ο ορισμός του ιονισμού του εδάφους εισάγει την έννοια της κρίσιμης έντασης E_c , η οποία αποτελεί και τον κρίσιμο παράγοντα για την έναρξη του φαινομένου του ιονισμού.

2.2 Συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης όταν εκδηλώνεται φαινόμενο ιονισμού

2.2.1 Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η κρουστική (μεταβατική) σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη προς το εγχεόμενο ρεύμα [7], [9], [24], [27].

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (2.1)$$

Αυτή η τιμή εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη μορφή του επιβαλλόμενου ρεύματος.

Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων της.

Οι σχέσεις (2.2)-(2.5) που ακολουθούν εκφράζουν τους ορισμούς των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 :

$$Z_1 = \max(z(t)) \quad (2.2)$$

$$Z_2 = \frac{U_{\max}}{i_{U_{\max}}} \quad (2.3)$$

$$Z_3 = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (2.4)$$

$$Z_4 = \frac{U_{I_{\max}}}{I_{\max}} \quad (2.5)$$

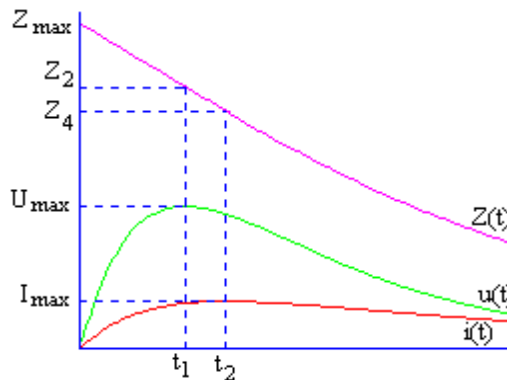
όπου Z_1 είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα

Z_2 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς το ρεύμα τη στιγμή κατά την οποία η τάση λαμβάνει η μέγιστη τιμή της

Z_3 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος

Z_4 είναι ο λόγος της τιμής της τάσης όταν το ρεύμα λαμβάνει η μέγιστη τιμή προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος

Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 2.1 Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης

Μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$.

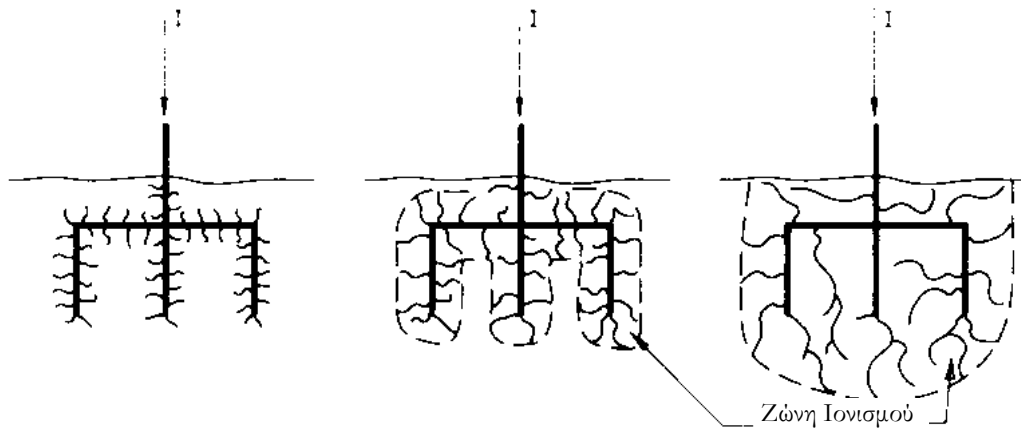
2.2.2 Κρουστική Συμπεριφορά Ηλεκτροδίου Γείωσης

Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, που διεγείρονται από μεγάλου πλάτους κρουστικά ρεύματα (όπως τα κεραυνικά ή τα οφειλόμενα σε σφάλματα) ουσιαστικά διαφέρει από εκείνη που παρατηρείται για ρεύματα μικρών συχνοτήτων και μικρού πλάτους και έχει αποτελέσει πεδίο εκτεταμένης έρευνας από πλήθος ερευνητών. Το κρίσιμο μέγεθος που καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης σε κεραυνικά ρεύματα ή ρεύματα σφάλματος είναι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση ή αλλιώς κρουστική αντίσταση του συστήματος γείωσης. Πλήθος ερευνητών [25]-[28] έχει μελετήσει τη μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης πραγματοποιώντας πειράματα με την έγχυση κρουστικών ρευμάτων και τάσεων τόσο σε συγκεντρωμένα όσο και σε εκτεταμένα συστήματα γειώσεων. Από τα πειράματα έχει παρατηρηθεί ότι η κρουστική αντίσταση λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την τιμή της αντίστασης γείωσης μόνιμου καταστάσεως. Από την άλλη, σε πλήθος πειραμάτων που διεξάγονται σε συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο η μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης να εμφανίζει τιμές μικρότερες από τις τιμές της μόνιμης κατάστασης. Η συμπεριφορά αυτή έχει αποδοθεί στο φαινόμενο της διάσπασης του εδάφους.

Αναλυτικότερα, το 1928 ο Towne [29] διεξήγαγε κρουστικές δοκιμές σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια. Διαπίστωσε ότι η αντίσταση γείωσης σε κρουστικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση γείωσης στη μόνιμη κατάσταση. Μάλιστα όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης τόσο μειώνεται η τιμή της μεταβατικής αντίστασης. Ο συγγραφέας απέδωσε τη μείωση της ειδικής αντίστασης στη γεφύρωση μέσω τόξων της υψηλής αντίστασης, που εμφανίζεται μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Το συμπέρασμα αυτό αποτέλεσε το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα των χαρακτηριστικών των συστημάτων γείωσης αλλά και του εδάφους υπό μεταβατικές συνθήκες.

Το 1958 ο Korsuncev [30] εφήρμοσε τη μέθοδο ομοιότητας (similitude method) για τον υπολογισμό των μεταβατικών χαρακτηριστικών διαφόρων ηλεκτροδίων. Ο Korsuncev υπέθεσε ότι η ζώνη εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω

από το ηλεκτρόδιο, ότι η E_c ορίζει την περιοχή εντός της οποίας η ειδική αντίσταση θεωρείται μηδενική και αγνόσε φαινόμενα της χρονικής υστέρησης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**, καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται, η ζώνη ιονισμού γύρω από το σύστημα γείωσης συνεχώς επεκτείνεται. Για το λόγο αυτό, το σχήμα του ηλεκτροδίου παύει να παίζει ρόλο. Έτσι, ο Korsuncev εισήγαγε την έννοια της χαρακτηριστικής διάστασης (S), η οποία ορίζεται ως η απόσταση του γεωμετρικού μέσου του ηλεκτροδίου από το πιο απομακρυσμένο σημείο του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.2 Ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού γύρω από ηλεκτρόδιο

Σύμφωνα με το μοντέλο του Korsuncev η σύνθετη μεταβατική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια των αδιάστατων παραμέτρων που δίδονται από τους τύπους (2.6) και (2.7):

$$\pi_1 = \frac{R_i \cdot S}{\rho} \quad (2.6)$$

$$\pi_2 = \frac{\rho \cdot I}{S^2 \cdot E_c} \quad (2.7)$$

όπου R_i είναι η κρουστική σύνθετη αντίσταση (Ω)

S είναι η χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου (m)

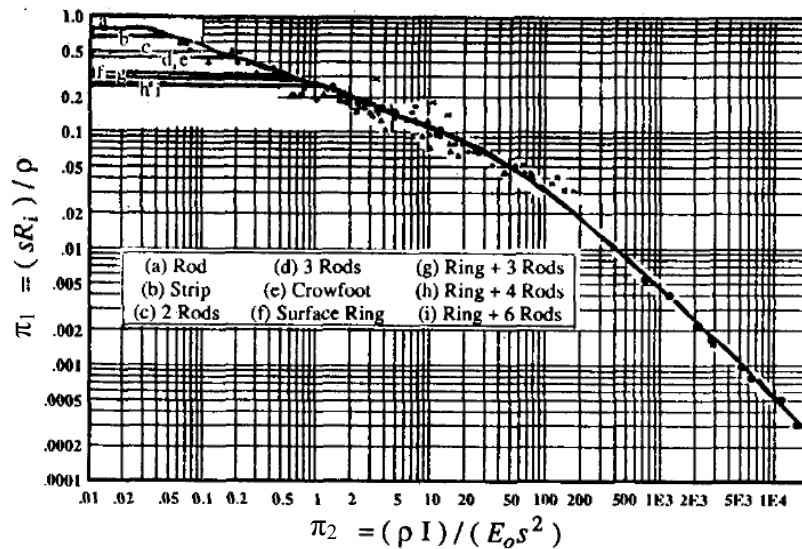
ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)

I είναι το εγχεόμενο ρεύμα (A)

E_c είναι η κρίσιμη ένταση (Ω/m)

Η παράμετρος π_1 ορίζεται ως η κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση ή ως η σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα ειδικής αντίστασης για μοναδιαίο μήκος ηλεκτροδίου και εξαρτάται της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου. Η παράμετρος π_2 περιγράφει την αναλογία του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου προς την E_c και δεν εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου.

Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζονται σε διάγραμμα τα ζεύγη τιμών των παραμέτρων π_1 και π_2 για διάφορους τύπους ηλεκτροδίων, που εξετάστηκαν σε εργασίες των Korsuncev [30] και Popolanasky [31].



Σχήμα 2.3 Μεταβολή της π_1 συναρτήσει της π_2 .

Η Oettle [7] το 1988 πρότεινε μία καμπύλη με τη βοήθεια της οποίας είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η μεταβατική σύνθετη αντίσταση ηλεκτροδίων γείωσης. Η καμπύλη αυτή αποτελεί επέκταση της καμπύλης που είχε προταθεί από τον Korsuncev. Για την εκτίμηση αυτής της καμπύλης η E_c θεωρήθηκε απλά ως ένας παράγοντας που δεν σχετίζεται με τη διάσπαση του εδάφους ή το είδος του εδάφους, έτσι η τιμή της λήφθηκε αυθαίρετα ίση με 10kV/cm για όλα τα είδη εδάφους, εφόσον δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ της E_c και της χαρακτηριστικής διάστασης των ηλεκτροδίων ή της τιμής του εγγεόμενου ρεύματος. Η μεταβατική αντίσταση υπολογίστηκε από τον τύπο (2.8):

$$Z = \frac{V_{t=6\mu s}}{I_{t=6\mu s}} \quad (2.8)$$

όπου $V_{t=6\mu s}$ είναι η τάση τη χρονική στιγμή 6μs

$I_{t=6\mu s}$ είναι η ένταση τη χρονική στιγμή 6μs.

Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα των Berger [23], Bellaschi [11], Liew [9], Oettle [32]. Επιπλέον, η Oettle εισήγαγε ένα διαφορετικό ορισμό της χαρακτηριστικής διάστασης του ηλεκτροδίου. Σύμφωνα με την Oettle η χαρακτηριστική διάσταση h ορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$h = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + d^2} \quad (2.9)$$

όπου h_1 είναι μεγαλύτερη οριζόντια διάσταση του συστήματος ηλεκτροδίων

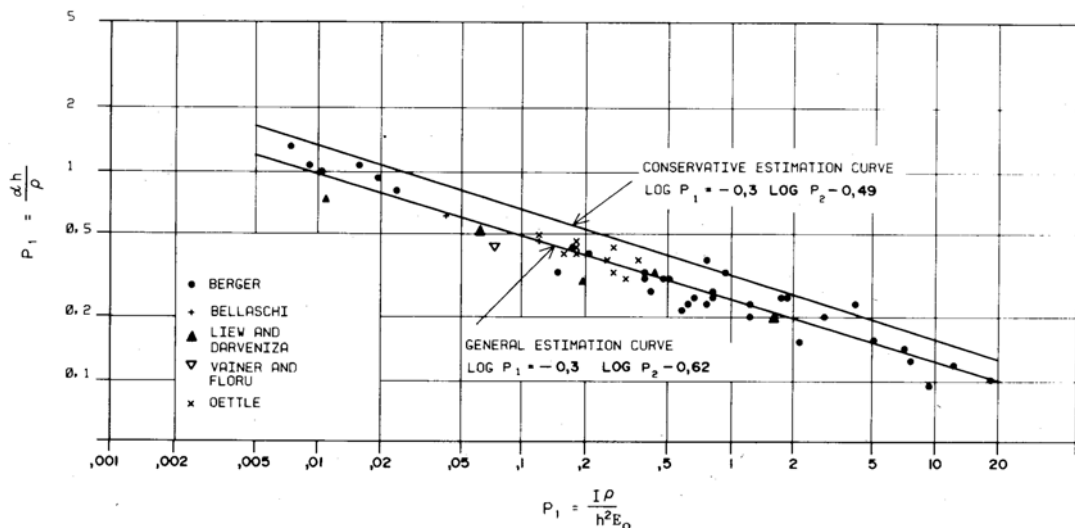
h_2 είναι μεγαλύτερη διάσταση, που είναι κάθετη της μεγαλύτερης οριζόντιας διάστασης του συστήματος ηλεκτροδίων

d είναι το βάθος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων.

Με τη χρήση όλων αυτών των δεδομένων προτάθηκε η ακόλουθη καμπύλη

$$\log P_1 = -0,3 \cdot \log P_2 - 0,62 \quad (2.10)$$

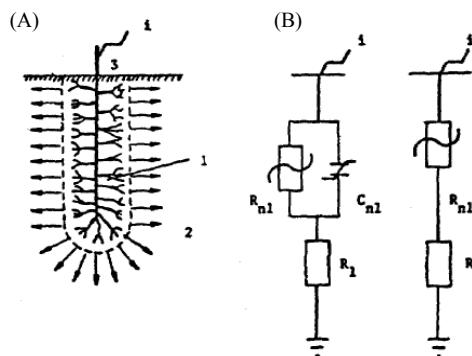
η οποία παρουσιάζεται γραφικά μαζί με τα δεδομένα στο **Σχήμα 2.4**. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και μια δεύτερη καμπύλη, πιο πάνω από την καμπύλη της εξίσωσης (2.10), η οποία έχει επιλεγεί έτσι ώστε για το 95% των δεδομένων οι πραγματικές τιμές P_1 να είναι μικρότερες από τις εκτιμούμενες.



Σχήμα 2.4 Μεταβολή της P_1 συναρτήσει της P_2

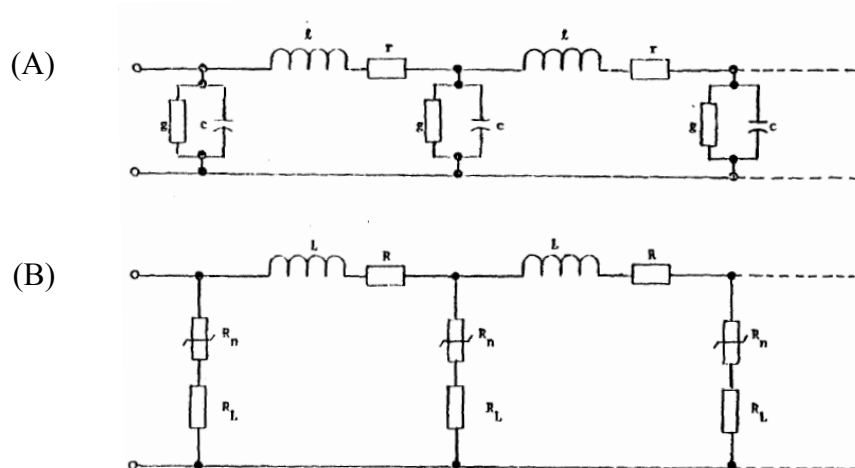
Οι Kosztaluk et al. [33] πρότειναν ένα αναλογικό μοντέλο υπολογισμού της κρουστικής αντίστασης γείωσης, που λαμβάνει υπ' όψιν του τόσο το θερμικό μηχανισμό όσο και το μηχανισμό ιονισμού. Βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι το μήκος του ηλεκτροδίου (l_{rod}) είναι πολύ μικρότερο του γινομένου της ταχύτητας διάδοσης (θ) του ρεύματος επι το χρόνο κορυφής της κυματομορφής του ρεύματος (T_{cr}), δηλαδή: $l_{rod} \leq \theta T_{cr}$

Έτσι η κρουστική αντίσταση μπορεί ν' αναπαρασταθεί από ένα μη γραμμικό στοιχείο Z_n , που περιγράφει τη ζώνη όπου εκδηλώνονται τόξα, και ένα γραμμικό στοιχείο R_1 εν σειρά με το Z_n , το οποίο προσομοιώνει τον ηλεκτρολυτικό μηχανισμό. Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζονται οι ζώνες και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους. Το μη γραμμικό στοιχείο Z_n μοντελοποιείται από μία μη γραμμική αντίσταση R παράλληλα με έναν μη γραμμικό πυκνωτή C_n (η συμβολή του οποίου μπορεί να αμεληθεί).



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης εκδήλωσης τόξων (1) και της ζώνης εκδήλωσης του θερμικού μηχανισμού (2) ενός απλού ηλεκτροδίου (A) και κυκλωματικά ισοδύναμα αυτών (B).

Στην περίπτωση ενός ηλεκτροδίου με μήκος μεγαλύτερο από 15m θα πρέπει να γίνει αναπαράσταση του ηλεκτροδίου με τη βοήθεια κατανεμημένων παραμέτρων, που αναπαριστούν την ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή (l) και αντίσταση του ηλεκτροδίου (r), ενώ τα g και c αντιστοιχούν στην ανά μονάδα μήκους αγωγιμότητα και χωρητικότητα του εδάφους. Τότε είναι δυνατόν το ηλεκτρόδιο να αναπαρασταθεί από το μοντέλο του **Σχήματος 2.6**.



Σχήμα 2.6 Προσέγγιση ηλεκτροδίου ως γραμμής μεγάλου μήκους με κατανεμημένες σταθερές (A) και το ισοδύναμο κύκλωμα (B).

Οι Velazquez και Mukhedkar [34] πρότειναν ένα γενικευμένο μοντέλο για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης. Για την επιβεβαίωση μάλιστα της αξιοπιστίας του μοντέλου τους συνέκριναν τα αποτελέσματα που αυτό έδωσε με πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών [23], [35].

Για την ανάπτυξη του μοντέλου τους αρχικά υπέθεσαν ότι η αγωγιμότητα, η διαπερατότητα και η επιτρεπτότητα του εδάφους παρέμεναν σταθερές. Αναλυτικότερα, υιοθετώντας το μοντέλο των ομοιόμορφα κατανεμημένων παραμέτρων (Σχήμα 2.7) προσδιόρισαν τις μαθηματικές εκφράσεις του ρεύματος και της τάσης συναρτήσει του χρόνου και συνεπώς τη μαθηματική έκφραση της κρουστικής αντίστασης. Στη συνέχεια, μοντελοποίησαν τον αγωγό γείωσης με μικρά τμήματα συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Κάθε τμήμα, με κατάλληλο ορισμό των οριακών συνθηκών, μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητο. Με την υπόθεση ότι η ζώνη εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο, μοντελοποίησαν το φαινόμενο της διάσπασης. Η περιοχή εντός της οποίας εκδηλώνεται η διάσπαση του εδάφους υπολογίζεται βάσει του τύπου (2.11):

$$r_c = \frac{I_0}{2\pi l E_c} \quad (2.11)$$

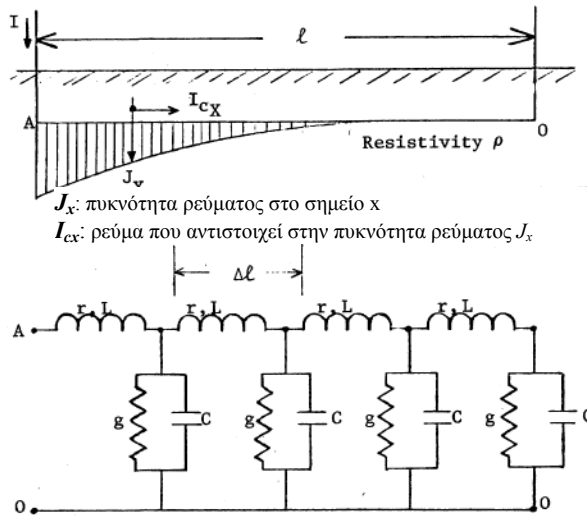
όπου I είναι το εγχεόμενο ρεύμα

ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους

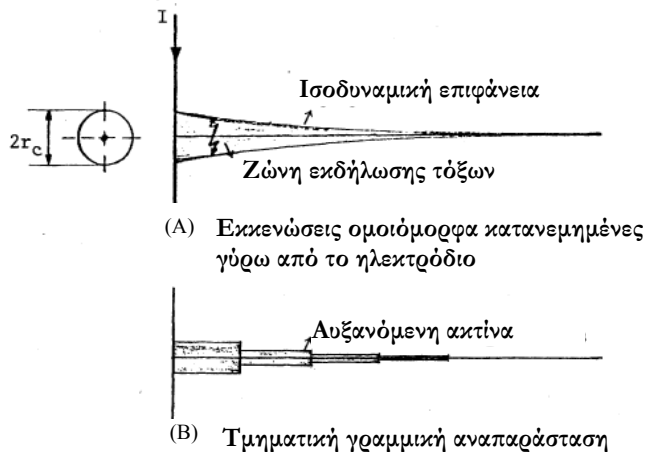
l είναι το μήκος του ηλεκτροδίου

E_c η κρίσιμη ένταση

Στις περιπτώσεις ηλεκτροδίων μεγάλου μήκους, το ρεύμα δεν έχει την ίδια τιμή σε όλο το μήκος. Η ακτίνα ιονισμού, επομένως, πρέπει να υπολογισθεί χωριστά για κάθε ένα τμήμα, κατά μήκος του οποίου η τιμή του ρεύματος είναι η ίδια (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.7 Αναπαράσταση του ηλεκτροδίου ως γραμμή με κατανομημένες παραμέτρους.



Σχήμα 2.8 Απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτροδίου με αυξημένες διαστάσεις υποθέτοντας ισοδυναμική επιφάνεια (A) και τμηματική γραμμική αναπαράσταση (B).

Οι Geri et al [36] έλαβαν υπ' όψιν την εκδήλωση μη γραμμικών φαινομένων, τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων αλλά και του εδάφους και ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεταβατικής ανάλυσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης. Στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζεται η γεννήτρια κρουστικού ρεύματος (G), το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κατακόρυφου ηλεκτροδίου, αποτελούμενο από τα στοιχεία R_e και L_e , R_i και C_i είναι οι παράμετροι που περιγράφουν τον ιονισμό και R_m και C_m είναι οι παράμετροι του εδάφους ενώ R_∞ και C_∞ είναι οι παράμετροι του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των χωρητικοτήτων και των αυτεπαγωγών μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίζονται από τους τύπους:

$$R_e = \frac{\rho_e}{\pi r_e^2} \quad (2.12)$$

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi l} \ln \frac{r_i(r_e + 1)}{r_e(r_i + 1)} \quad (2.13)$$

$$R_m = \frac{\rho_g}{2\pi l} \ln \frac{r_m(r_i + 1)}{r_i(r_m + 1)} \quad (2.14)$$

$$R_\infty = \frac{\rho_g}{2\pi l} \ln \frac{r_\infty(r_m + 1)}{r_m(r_\infty + 1)} \quad (2.15)$$

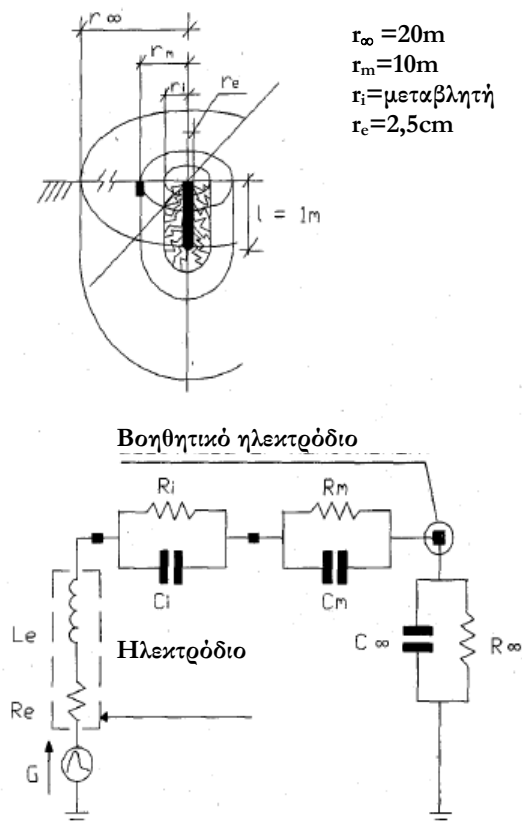
όπου ρ_e είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου

ρ_i λαμβάνεται ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου

ρ_g είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, η οποία θεωρείται σταθερή

$$r_i = \max \left[r_i, \text{abs}(I_g) \frac{\rho_g}{2\pi/E_c} \right] \quad (2.16)$$

όπου I_g είναι το εγχεόμενο ρεύμα



Σχήμα 2.9 Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο και το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης.

Ο Geri [37] πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο σε κυκλωματική προσέγγιση για την κρουστική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία τη συμπεριφορά σύνθετων συστημάτων γείωσης, όταν λαμβάνουν χώρα μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους και υλοποιείται μέσω του ακόλουθου υπολογιστικού κώδικα:

- Τμήμα εισόδου: Ως είσοδοι λαμβάνονται η κυματομορφή του ρεύματος, τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τα σημεία έγχυσης του ρεύματος.
- Τμήμα αρχικοποίησης των τιμών: Όλα τα ηλεκτρόδια αντικαθίστανται από τα ισοδύναμά τους κυλινδρικά. Τα ηλεκτρόδια διαιρούνται σε μικρότερα τμήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μία επαγωγή, μία χωρητικότητα, μία αντίσταση σειράς, μία αγωγιμότητα ως προς γη και τις αμοιβαίες συζεύξεις με τα άλλα στοιχειώδη τμήματα του συστήματος γείωσης. Αυτές οι ηλεκτρικές παράμετροι υπολογίζονται θεωρώντας κάθε

στοιχειώδες τμήμα ως γραμμή μεταφοράς με απώλειες σε ημιστατικές συνθήκες.

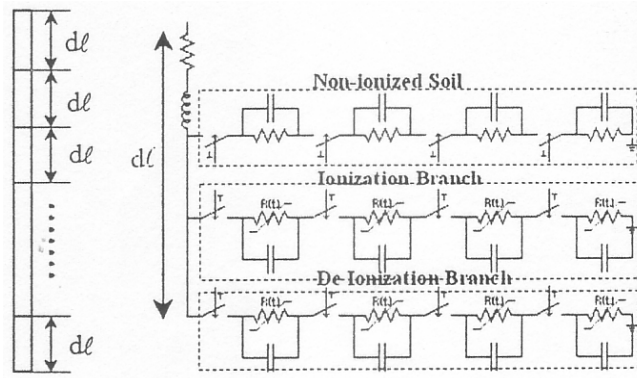
- Τμήμα επίλυσης: Πραγματοποιείται ανάλυση του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος στο πεδίο του χρόνου με χρήση τυπικών αλγορίθμων που προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να προσομοιώνουν το φαινόμενο του ιονισμού.
- Τμήμα εξόδου: Υπολογίζεται η μεταβατική σύνθετη αντίσταση και η κατανομή των τάσεων και των ρευμάτων κατά μήκος του συστήματος γείωσης.

Η αξιοπιστία του παραπάνω μοντέλου ελέγχθηκε μέσω της σύγκρισής του με αποτελέσματα πειραμάτων για ρεύματα διέγερσης με μικρό και μεγάλο πλάτος.

Οι Cidras et al. σε άρθρο τους [38] περιγράφουν τον αλγόριθμο που ανέπτυξαν για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, στην οποία συμπεριέλαβαν και το φαινόμενο του ιονισμού. Η μέθοδος επιλύει το σύστημα ως ηλεκτρικό δίκτυο στο πεδίο της συχνότητας και στη συνέχεια η απόκριση λαμβάνεται με εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier. Για να είναι δυνατή η προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού μεταβάλλεται η ακτίνα των αγωγών όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά την κρίσιμη τιμή.

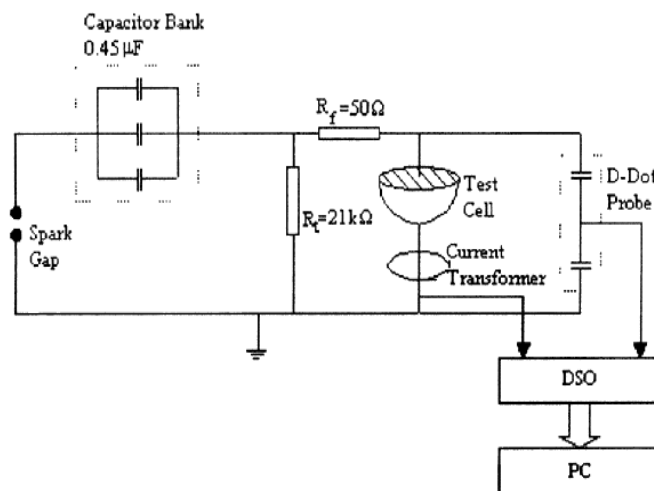
Στη διδακτορική της διατριβή η Λορέντζου [28] υλοποίησε κυκλωματικό μοντέλο κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης κατάλληλο για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής απόκρισης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο. Για το σκοπό αυτόν, το έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο χωρίστηκε σε στοιχειώδη κελύφη πάχους dr , των οποίων η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με το χρόνο. Το ηλεκτρόδιο προσομοιώθηκε με μία αντίσταση εν σειρά με μία αυτεπαγωγή, ενώ τα εγκάρσια στοιχεία (αγωγιμότητα παράλληλα με πυκνωτή) μεταβάλλονται καθώς εξελίσσονται τα φαινόμενα του ιονισμού και του απιονισμού. Έτσι στο μοντέλο, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.10**, συμπεριλαμβάνονται δύο εγκάρσιοι κλάδοι, τα στοιχεία των οποίων ενεργοποιούνται εναλλάξ μέσω ενός υποδικτύου ελέγχου διακοπών. Όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους, τμηματικά ενεργοποιείται ο δεύτερος

κλάδος του *Σχήματος 2.10*, ενώ κατά την εξασθένιση του φαινομένου ενεργοποιείται ο τρίτος κλάδος.



Σχήμα 2.10 Διαμέριση του ηλεκτροδίου (αριστερά) και μοντελοποίηση του ιονισμού για ένα στοιχειώδες τμήμα dl (δεξιά).

Οι Nor et al. [39] χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη του *Σχήματος 2.11* και το δοχείο δοκιμών του *Σχήματος 2.12* για τη διεξαγωγή πειραμάτων με στόχο την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του ιονισμού στην τιμή της μεταβατικής τιμής της αντίστασης του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.11 Πειραματική διάταξη για τη μελέτη του ιονισμού



Σχήμα 2.12 Δοχείο χώματος

Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι για υψηλές τιμές της τάσης ο χρόνος μετώπου της τάσης και του ρεύματος ήταν αρκετά μικρός και μάλιστα η κυματομορφή του ρεύματος παρουσίαζε δύο μέγιστες τιμές. Αυτή η ‘δεύτερη’ κορυφή της κυματομορφής του ρεύματος συμβαίνει με κάποια χρονική καθυστέρηση και είναι ένδειξη του φαινομένου του ιονισμού. Από την κυματομορφή του ρεύματος είναι δυνατόν να υπολογιστούν δύο χρόνοι t_1 και t_2 , που αντιστοιχούν στη στιγμή έναρξης του ιονισμού και στο δεύτερο μέγιστο του ρεύματος. Καθώς μάλιστα αυξάνεται η αγωγιμότητα του χώματος και η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, οι χρόνοι αυτοί μειώνονται. Βάσει των παραπάνω όρισαν δύο τιμές αντίστασης: Μία τιμή που περιγράφει την αντίσταση πριν την εκδήλωση του φαινομένου του ιονισμού ($R_1(t)$) και μία που αντιστοιχεί στην μεταβατική αντίσταση όταν έχει συμβεί ο ιονισμός και μάλιστα έχει λάβει τη μέγιστη έκτασή του ($R_2(t)$), οι οποίες περιγράφονται από τους τύπους:

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \quad (2.17)$$

$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \quad (2.18)$$

όπου I_{peak1} είναι η πρώτη μέγιστη τιμή του ρεύματος

I_{peak2} είναι δεύτερη μέγιστη τιμή του ρεύματος

$V_{I_{peak1}}$ είναι τάση τη στιγμή που συμβαίνει το πρώτο μέγιστο του ρεύματος

$V_{I_{peak2}}$ είναι τάση τη στιγμή που συμβαίνει το δεύτερο μέγιστο του ρεύματος

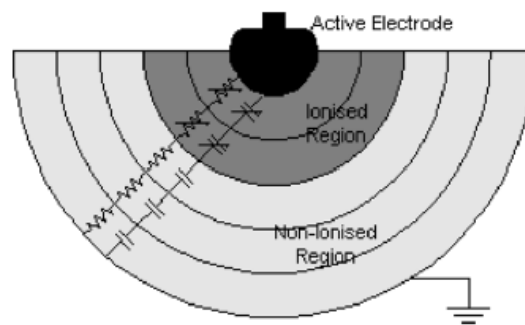
Οι συγγραφείς θεώρησαν ότι η ζώνη ιονισμού επεκτείνεται ομοιόμορφα, η σταθερά ιονισμού είναι τ_i και ότι ακολουθεί ισοδυναμική κατανομή σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος γύρω από το ηλεκτρόδιο, η αντίσταση κάθε κελύφους θα μειώνεται, καθώς το έδαφος ιονίζεται. Η δυναμική αυτού του μηχανισμού μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση :

$$R(t) = R_1(t) \left(\frac{R_2(t)}{R_1(t)} + e^{-t/\tau_i} \right) \quad (2.19)$$

όπου R_1 είναι η αντίσταση πριν τον ιονισμό

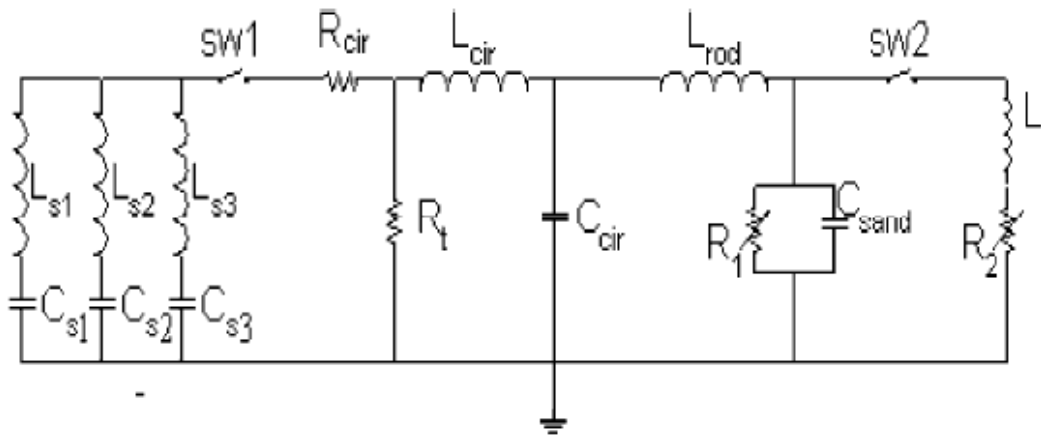
R_2 είναι η αντίσταση μετά τον ιονισμό

τ_i είναι η χρονική σταθερά εξέλιξης του ιονισμού



Σχήμα 2.13 Σχηματική αναπαράσταση του δοχείου δοκιμών και των ζωνών ιονισμού.

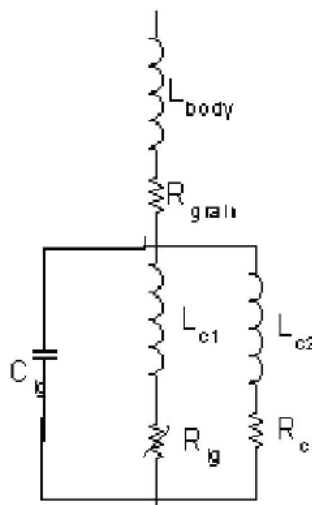
Στο **Σχήμα 2.13** παρουσιάζονται τα ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία, για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού. Όπως φαίνεται, το έδαφος αναπαρίσταται από στοιχειώδεις παράλληλες αντιστάσεις (η τιμή των οποίων καθορίζεται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και τις διαστάσεις των περιοχών) ανάλογες προς την R_1 και χωρητικότητες που αντιστοιχούν στην αγωγιμότητα του εδάφους. Η περιοχή του ιονισμού αντιπροσωπεύεται από αντιστάσεις με πολύ μικρότερες τιμές που σε ιδανική προσομοίωση τείνουν προς το μηδέν. Καθώς η περιοχή του ιονισμού αυξάνεται, η συνολική αντίσταση του υπό δοκιμή εδάφους μειώνεται (αντίστοιχα προς την R_2). Αυτό το σκεπτικό οδηγεί στη μορφοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος, που φαίνεται στο ακόλουθο **Σχήμα 2.14**.



Σχήμα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους.

Το ισοδύναμο κύκλωμα [39] αποτελείται από δύο κύριους παράλληλους κλάδους, που προσομοιώνουν την κατάσταση πριν τον ιονισμό και λαμβάνουν υπ' όψιν τα φαινόμενα του ιονισμού συμπεριλαμβάνοντας την σταθερά καθυστέρησης του φαινομένου. Οι δύο αυτοί κλάδοι αποτελούνται από ένα κύκλωμα αντίστασης-πυκνωτή, και μάλιστα η αντίσταση είναι εκείνη που έχει πολύ έντονη μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος. Κατά τον ιονισμό, το ρεύμα που διαρρέει τη μεταβλητή αντίσταση R_1 είναι εκείνο που κυριαρχεί και έτσι ο πυκνωτής μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν παίζει μεγάλο ρόλο. Συμπερασματικά οι δύο κύριοι παράλληλοι κλάδοι προσομοιώνουν την προ-ιονισμού κατάσταση, η οποία μπορεί να παρασταθεί από την R_1 και χωρητικότητες, C_{sand} , και λαμβάνουν υπόψη το στάδιο με τις επιδράσεις του ιονισμού, που παριστάνεται από αρκετά χαμηλότερες αντιστάσεις, R_2 . Εδώ η χωρητικότητα εξαλείφεται εξαιτίας της χαμηλής της επίδρασης στο στάδιο του ιονισμού. Από την άλλη πλευρά, ένα επαγωγικό στοιχείο L εμφανίζεται για να ληφθεί υπόψη η χρονική καθυστέρηση μέχρι την έναρξη του ιονισμού t_1 . Όμως αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι ανεξάρτητη των πλατών της τάσης. Ο διακόπτης SW1 αναπαριστά το σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας, και ο SW2 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού. Κατά τους συγγραφείς η παράλληλη χωρητικότητα C_{sand} δεν έχει επίδραση στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και συνεπώς μπορεί να μη ληφθεί υπόψη.

Για χρονικές καθυστερήσεις που εξαρτώνται από τις εφαρμοζόμενες τάσεις οι Haddad et al πρότειναν το ισοδύναμο μοντέλο καθοδικού αλεξικέραυνου ZnO [40]. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.15**, το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα αποτελείται από δύο τμήματα: ένα που μεταφέρει το υψηλού πλάτους ρεύμα εκφόρτισης και αποτελείται από μια υψηλής τιμής μη γραμμική αντίσταση R_{lg} και μια χαμηλή αυτεπαγωγή L_{c1} , ενώ ένα παράλληλο δίκτυο υπάρχει για να μεταφέρει τα ρεύματα χαμηλού πλάτους και αποτελείται από μια γραμμική αντίσταση R_c και μια υψηλή αυτεπαγωγή L_{c2} .

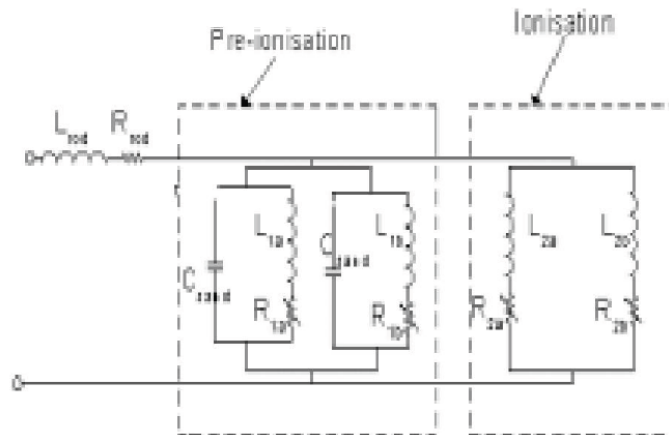


Σχήμα 2.15 Προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα καθοδικού αλεξικέραυνου ZnO.

Παρατηρούμε ότι τα ισοδύναμα κυκλώματα των **Σχημάτων 2.14** και **2.15** είναι παρόμοια. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι για το μοντέλο του καθοδικού αλεξικέραυνου ZnO οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει αυτεπαγωγή και στους δύο παράλληλους κλάδους για να λάβουν υπόψη τις χρονικές καθυστερήσεις, καθώς τα επίπεδα τάσης αυξάνονται.

Οι συγγραφείς εκμεταλλευόμενοι την ομοιότητα της διαδικασίας του ιονισμού με αυτή της συμπεριφοράς των καθοδικών αλεξικέραυνων πρότειναν ένα βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους [40], που θα περιλαμβάνει αυτεπαγωγές και στα δύο παράλληλα δίκτυα έτσι ώστε να λάβουν υπόψη την επίδραση της χρονικής καθυστέρησης. Το νέο αυτό βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο **Σχήμα 2.16**, όπου υψηλές αυτεπαγωγές (L_{1b}

και L_{2b}) είναι σε σειρά με τις R_{1b} και R_{2b} για να αναπαραστήσουν το στάδιο προ-ιονισμού που μεταφέρει χαμηλά πλάτη ρεύματος, ενώ χαμηλές αυτεπαγωγές (L_{1a} και L_{2a}) είναι σε σειρά με τις R_{1a} και R_{2a} για να αναπαραστήσουν το στάδιο ιονισμού που μεταφέρει υψηλά πλάτη ρεύματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές R_{1a} , R_{2a} , R_{1b} , R_{2b} προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.16 Βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

Τα ισοδύναμα κυκλώματα των **Σχημάτων 2.14** και **2.16** είναι τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο **Κεφάλαιο 4**.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη – Πειραματική διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων που αφορούν στη διάσπαση του εδάφους, καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

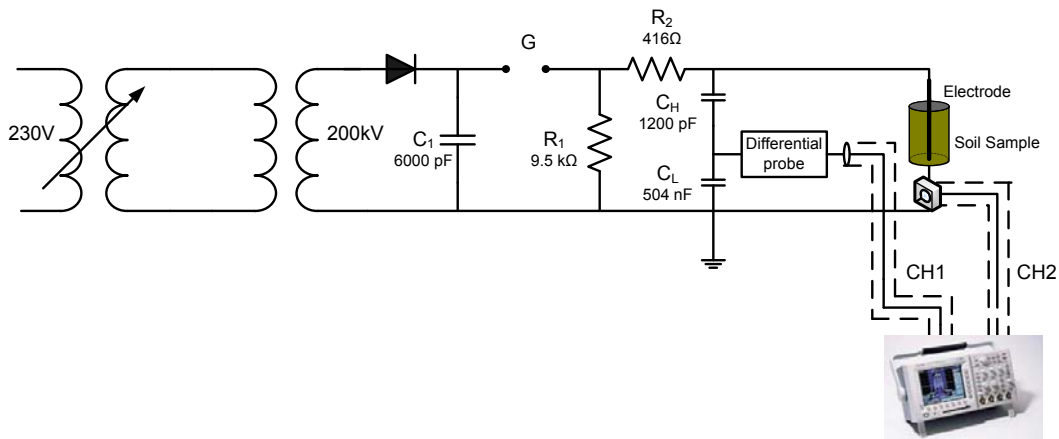
3.1 Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- λύομενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH Bamberg
- τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616
- σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW
- διαφορικός καταμεριστής MD 200 Schaffner WS-30
- αμπεροτσιμπίδα Current Monitor Pearson Model 8260
- παλμογράφος Tektronix TDS 3052
- ομοαξονικά καλώδια Ecoflex
- κλωβός Faraday
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625
- digital power meter WT210, Yokogawa

3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο **Σχήμα 3.1** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας.



Σχήμα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

3.2.1 Λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας [41]

Η λυόμενη κρουστική γεννήτρια της Messwandler-Bau GmbH Bamberg μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων της σαν γεννήτρια παραγωγής υψηλής εναλλασσόμενης, συνεχούς και κρουστικής τάσης με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον **Πίνακα 3.1**.

	Εναλλασσόμενη τάση χωρίς φορτίο	Συνεχής τάση χωρίς φορτίο	Κρουστική τάση χωρίς φορτίο
Μονοβάθμια	100kV/5kVA	140kV/20mA	140kV/245J
Διβάθμια	200kV/5kVA	280kV/15mA	280kV/490J
Τριβάθμια	300kV/5kVA	420kV/10mA	420kV/735J

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά της λυόμενης κρουστικής γεννήτριας της Messwandler-Bau GmbH Bamberg

Η λυόμενη γεννήτρια είναι μια συσκευή εύκολα συναρμολογήσιμη, αποτελείται από στοιχεία που περιέχουν μονωτικό λάδι ερμητικά κλεισμένο σε αυτά και έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν κατάλληλα αναγνωριστικά σύμβολα που διευκολύνουν στη λειτουργία της γεννήτριας από το χειριστή. Το εύρος της θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια είναι από -10°C έως και $+40^{\circ}\text{C}$.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος η γεννήτρια διαμορφώθηκε, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.2**, σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, που μπορεί να παράγει κρουστική τάση θετικής

και αρνητικής πολικότητας. Η τάση του δικτύου πόλεως (230V) φθάνει στο πρωτεύον του αυτομετασχηματιστή M_1 , μέσω του οποίου μπορούμε να ρυθμίζουμε τη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή M_2 με σχέση μεταφοράς 220V/200kV, μεταθέτοντας τη λήψη του δευτερεύοντος του M_1 .



Σχήμα 3.2 Ανόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Στη συνέχεια, η υψηλή εναλλασσόμενη τάση που παίρνουμε ανορθώνεται μέσω του ανορθωτικού στοιχείου, το οποίο περιέχει αντίσταση προστασίας, και μετατρέπεται σε συνεχή τάση U_- , η οποία φορτίζει τον πυκνωτή C_I . Μετά τη φόρτιση του πυκνωτή C_I ο σπινθηριστής $\Sigma\pi$ τίθεται σε κοινή τάση με τον πυκνωτή. Όπως είναι προφανές, το διάκενο του σπινθηριστή πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην προκαλείται διάσπαση προτού ο πυκνωτής C_I αποκτήσει την επιθυμητή τάση στα άκρα του. Η κρουστική τάση εμφανίζεται μεταξύ των άκρων κ_1 και κ_2 , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**.

Μόλις επέλθει η διάσπαση του σπινθηριστή, αρχίζει το στάδιο της εκφόρτισης της γεννήτριας. Την ώρα που ξεκινάει η διάσπαση του σπινθηριστή, ο πυκνωτής φορτίου C_H είναι εντελώς αφόρτιστος και γι' αυτό αρχικά δεν εμφανίζει σημαντική αντίδραση στη διέλευση του ρεύματος φόρτισης που περνά μέσα του, δηλαδή αρχικά συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα. Για τον λόγο αυτό, αρχικά αγνοείται η αντίδραση της R_I , αφού το ρεύμα επιλέγει να διέλθει από τον κλάδο με την μικρότερη αντίσταση.

Το πώς θα μεταβληθεί η τάση φόρτισης της γεννήτριας εξαρτάται από τον λόγο C_I/C_H . Βασική επιδίωξη είναι ο πυκνωτής κρούσης C_I να έχει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή φορτίου C_H , ώστε ένα μικρό μόνο μέρος του φορτίου του πυκνωτή C_I

να είναι σε θέση να φορτίσει τον C_H . Με άλλα λόγια, επιτυγχάνεται με δεδομένη τάση φόρτισης η παραγόμενη κρουστική τάση να είναι υψηλή και όσο το δυνατό πλησιέστερα στην τάση C_I .

Σημειώνεται ότι η παραγόμενη κρουστική τάση δεν μπορεί να φτάσει το πλάτος της ανορθωμένης τάσης U_- που χρησιμοποιείται στη φόρτιση της γεννήτριας. Το μέγεθος που καθορίζει πόσο κοντά στην τιμή U_- μπορεί να φτάσει η κρουστική τάση λέγεται συντελεστής χρησιμοποίησης n και ορίζεται:

$$n = \frac{U_{k(max)}}{U_-} \quad (3.1)$$

Δηλαδή ο συντελεστής χρησιμοποίησης n είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης $U_{k(max)}$ προς τη μέγιστη τιμή της ανορθωμένης τάσης με την οποία φορτίζεται η γεννήτρια U_- . Όσο υψηλότερος ο συντελεστής χρησιμοποίησης τόσο καλύτερα αξιοποιείται η γεννήτρια.

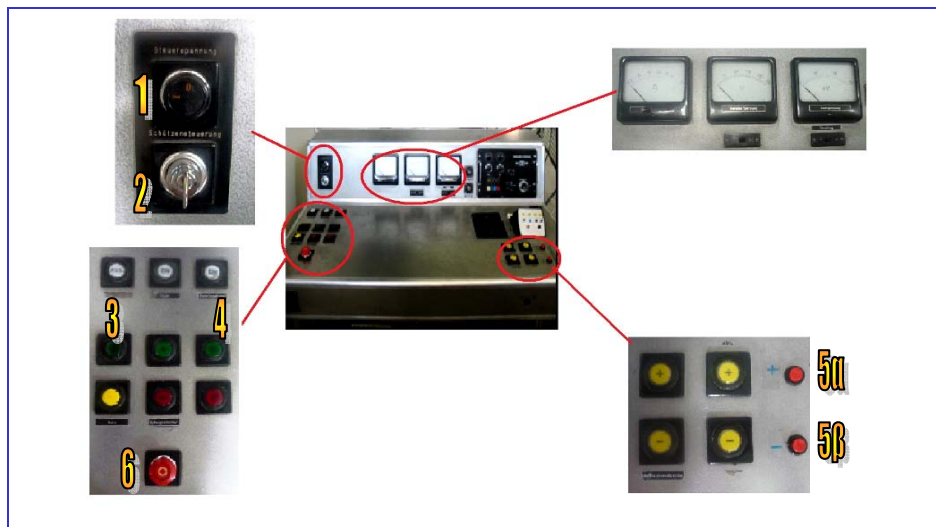
Μεγάλη σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο γειώνεται η γεννήτρια. Η γείωση αυτή πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στο δοκίμιο και στα στοιχεία R_I και C_I . Χρησιμοποιείται ειδικό ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο δε συνδέεται με τη γείωση του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Η ξεχωριστή αυτή προσγείωση λέγεται κρουστική γη και συνδέεται με το δίκτυο E.P. μέσω αντίστασης προστασίας (της τάξης των MΩ) και κατάλληλης ονομαστικής τάσης. Ο λόγος για τον οποίο γίνονται τα παραπάνω είναι ότι αν η γεννήτρια γειωνόταν πάνω στη γείωση του δικτύου, τότε λόγω των παράσιτων χωρητικοτήτων της γεννήτριας θα δημιουργούνταν βρόχοι μικρής αντίστασης στους οποίους θα επάγονταν υψηλές τάσεις μεγάλης συχνότητας, οι οποίες θα υπερτίθεντο στην κρουστική τάση και θα την παραμόρφωναν σημαντικά.

3.2.2 Τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616

Οι χειρισμοί της όλης διάταξης, καθώς και η παρακολούθηση της λειτουργίας είναι δυνατοί από την τράπεζα ελέγχου και χειρισμών, η οποία φαίνεται στο **Σχήμα 3.3**. Η τράπεζα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων (1)
- Κλειδί (2)
- Buttons για να τίθεται υπό τάση και εκτός τάσης η γεννήτρια (3,4)

- Buttons μέσω των οποίων ελέγχεται η αυξομείωση του διακένου του σπινθηριστή και ρυθμίζεται η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή M_1 (5α, 5β)
- Αμπερόμετρο, βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον του M_1 και βολτόμετρο για τη μέτρηση της υψηλής συνεχούς τάσης υπό την οποία φορτίζεται ο πυκνωτής κρούσης
- Διακόπτη ταχείας θέσεως εκτός τάσης σε περίπτωση κινδύνου (6) και ηλεκτρονόμος υπερεντάσεως



Σχήμα 3.3 Τράπεζα ελέγχου και χειρισμών

3.2.3 Μηχανισμός μεταβολής αποστάσεως σφαιρών

Η απόσταση μεταξύ των σφαιρών του σπινθηριστή μεταβάλλεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα ο οποίος ελέγχεται από τη τράπεζα χειρισμών πιέζοντας το κατάλληλο button. Έτσι η απόσταση μεταξύ των σφαιρών μπορεί να μεταβληθεί από 0 έως 80mm.

3.2.4 Σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW

Ο χρησιμοποιούμενος σταθεροποιητής 3kW, εξασφαλίζει ότι για τη μεταβολή της τάσης του δικτύου εντός των ορίων $230V \pm 10\%V$, η τάση στην έξοδο του θα έχει μικρή διακύμανση $230V \pm 0,5\%V$ (μεταξύ 228,9 και 231,1V).



Σχήμα 3.4 Σταθεροποιητής τάσης

3.2.5 Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner WS-30 [42]

Τα διαφορικά probe είναι συσκευές με τις οποίες οι παλμογράφοι μπορούν να καταγράψουν αρκετά υψηλές τιμές τάσεων, που μπορεί να εμφανιστούν στα κυκλώματα. Έτσι λοιπόν, εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, στους αναστροφείς, στους ελέγχους ταχύτητας των μηχανών και σε αρκετές άλλες εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή φαίνονται στον ακόλουθο **Πίνακα 3.2**, ενώ στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζεται το όργανο.

<i>Εξασθένιση</i>	<i>1:100/1000</i>
<i>Εύρος ζώνης</i>	<i>DC - 50MHz (-3db)</i>
<i>Ακρίβεια</i>	<i>± 2%</i>
<i>Σύνθετη αντίσταση εισόδου</i>	<i>10MΩ//7pF ως προς γη</i>
<i>Τάση εισόδου</i>	
<i>Διαφορικό εύρος</i>	<i>± 700V(DC+ Peak AC) ή 500Vrms για 1/100 ± 7000V(DC+ Peak AC) ή 5000Vrms για 1/1000</i>
<i>Μέγιστη τάση</i>	<i>± 7000V(DC+ Peak AC) ή 2500Vrms για 1/100 και 1/1000 ± 7000V(DC+ Peak AC) ή 5000Vrms για 1/100 και 1/1000</i>
<i>Τάση εξόδου</i>	
<i>Μέγιστο πλάτος</i>	<i>± 7V(μέσα σε 50kΩ ή περισσότερο)</i>

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή



Σχήμα 3.5 Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner

3.2.6 Αμπεροτσιμπίδα Pearson

Η αμπεροτσιμπίδα που χρησιμοποιήσαμε στη πειραματική μας διάταξη για να μετρήσουμε το ρεύμα που διέρρεε το κύκλωμά μας είναι η Current Monitor Pearson Model 8260, με λόγο μετασχηματισμού $0,002\text{V/A}$ και φαίνεται στο *Σχήμα 3.6*.



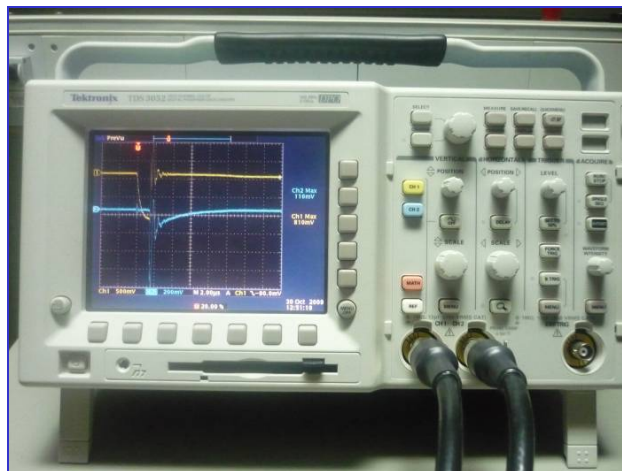
Σχήμα 3.6 Αμπεροτσιμπίδα

3.2.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052 [43]

Ο παλμογράφος αυτός, που είναι ένα από τα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί με εύρος ζώνης στα 500MHz, διαθέτει 2 κανάλια, οθόνη διαστάσεως 6 in (165mm) και ανάλυσης 640×480 και διαθέτει οδηγό δισκέτας (3,5') για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 3052 παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.7*, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον *Πίνακα 3.3* που ακολουθεί.

Κανάλια εισόδου	2
Εύρος ζώνης	500MHz, 5mV/div έως 1V/div
Χρόνος ανόδου	0,7ns
Ακρίβεια DC κέρδους	± 2%
Ζεύξη εισόδου	DC, AC ή GND
Αντίσταση εισόδου	1MΩ ± 1% παράλληλα με 13pF
Ευαισθησία εισόδου στα 50Ω	1mV/div έως 1V/div
Κάθετη ανάλυση	9 bit ανάλυση, ξεχωριστή για κάθε κανάλι
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	5 Vrms με κορυφές ≤ ± 30
Ταχύτητα δειγματοληψίας	100 S/s έως 5 GS/s

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά παλμογράφου



Σχήμα 3.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

3.2.8 Θερμόμετρο–Υγρόμετρο

Για τη καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασίας και θερμοκρασίας) κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε το υγρόμετρο - θερμόμετρο TESTO 625, το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 3.8**.



Σχήμα 3.8 Θερμόμετρο–υγρόμετρο

3.2.9 Ομοαξονικά καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια (Ch1 και Ch2), του παλμογράφου χρησιμοποιήσαμε ομοαξονικά καλώδια ECOFLEX 10-50 Ohm LOW LOSS με χαρακτηριστικά [4], που φαίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 3.4**.

Εσωτερικός αγωγός	Πλεγμένος χαλκός, $7 \times 1.0\text{mm}$
Διάμετρος εσωτερικού αγωγού	2.85mm
Διηλεκτρικό	Χαμηλής απώλειας μείγματος PE
Διάμετρος διηλεκτρικού	7,25mm
Εξωτερικός αγωγός 1	Χάλκινο έλασμα, με PE επικάλυψη
Θωράκιση	100%
Εξωτερικός αγωγός 2	Ανάμιξη χαλκού 72%
Περίβλημα	Μαύρο PVC, υν-αντίστασης
Εξωτερική διάμετρος	10.2 mm
Σύνθετη αντίσταση	50hm
Χωρητικότητα	78pF/m
F_{max}	6GHz
DC-αντίσταση κεντρικού αγωγού	3.3Ωhm/km
DC-αντίσταση εξωτερικού αγωγού	8.4Ωhm/km
Εξασθένηση 1GHz/100m	14.2dB
Εξασθένηση 1GHz/100ft	4.33dB

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά ομοαξονικού καλωδίου

3.3 Μετρήσεις

3.3.1 Προετοιμασία χώματος

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας επεξεργαστήκαμε ένα δείγμα χώματος, το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 3.9**.

Αρχικά, ζεστάναμε το δείγμα μας σε φούρνο στους 100°C, έτσι ώστε να επιτύχουμε την ξήρανση του. Στη συνέχεια, κοσκινίσαμε το δείγμα μας για να το καθαρίσουμε από τις περιττές προσμίξεις και να επιτευχθεί ομοιογένεια.

Για να επιτύχουμε το επιθυμητό επίπεδο υγρασίας του δείγματός μας, που στη δική μας συγκεκριμένη περίπτωση είναι 5%, προσδίδαμε τόση ποσότητα απιονισμένου νερού όση ήταν η αναλογία του ποσοστού υγρασίας ως προς το βάρος του ξηρού χώματος και στη συνέχεια ανακατεύαμε το μείγμα προκειμένου να επιτύχουμε την ομοιόμορφη κατανομή του νερού στο χώμα.



Σχήμα 3.9 Δείγμα χώματος Α

3.3.2 Δοκίμιο

Το δείγμα χώματος που χρησιμοποιήσαμε τοποθετήθηκε εντός κυλινδρικού δοχείου. Ο κύλινδρος ήταν φτιαγμένος από σίδηρο, ενώ οι βάσεις του ήταν ξύλινες. Στο κέντρο του έφερε χάλκινο ηλεκτρόδιο σταθερής διατομής, το οποίο έφτανε και ακουμπούσε την κάτω βάση του κυλίνδρου, ενώ προεξείχε από την πάνω. Στο *Σχήμα 3.10* που ακολουθεί φαίνεται ο μεταλλικός αυτός κύλινδρος που χρησιμοποιήσαμε.



Σχήμα 3.10 Μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ο κύλινδρος τοποθετείται κατακόρυφα. Για τιμή υγρασίας του δοκιμίου 5% έγιναν μετρήσεις με θετική πολικότητα κρουστικής τάσης, τα παλμογραφήματα των οποίων παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Α*.

Κεφάλαιο 4

Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους

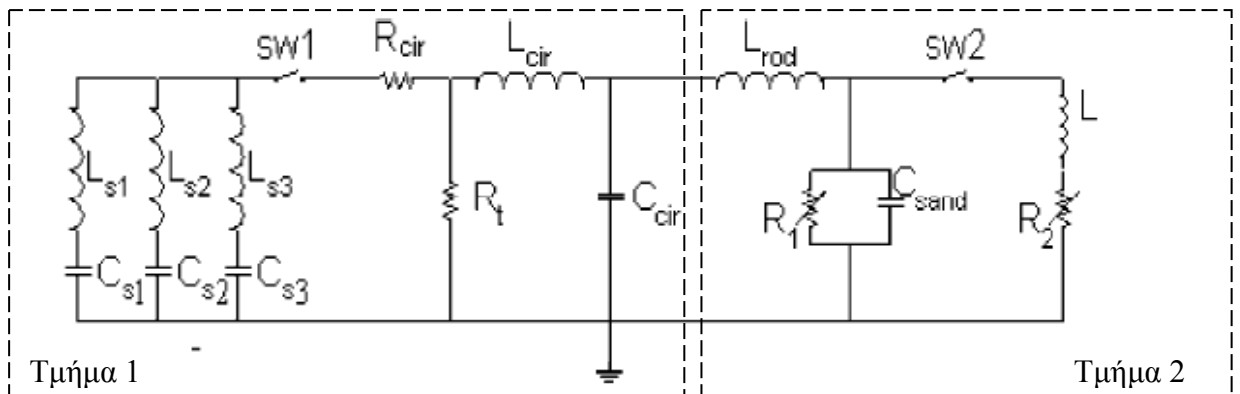
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους, όπως προτάθηκε από τους Nor et al [39]-[40], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του φαινομένου και κατόπιν γίνεται σχολιασμός της αποτελεσματικότητας της προσομοίωσης του κυκλωματικού μοντέλου.

4.1 Περιγραφή του κυκλώματος - Αποτελέσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, καθώς και η μεταβατική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα προτεινόμενα μοντέλα του ιονισμού του εδάφους [39]-[40], που προσομοιώσαμε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα PSCAD.

4.1.1 Κυκλωματικό μοντέλο

Αρχικά, δημιουργήσαμε στο PSCAD το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα, που φαίνεται στο *Σχήμα 4.1*.

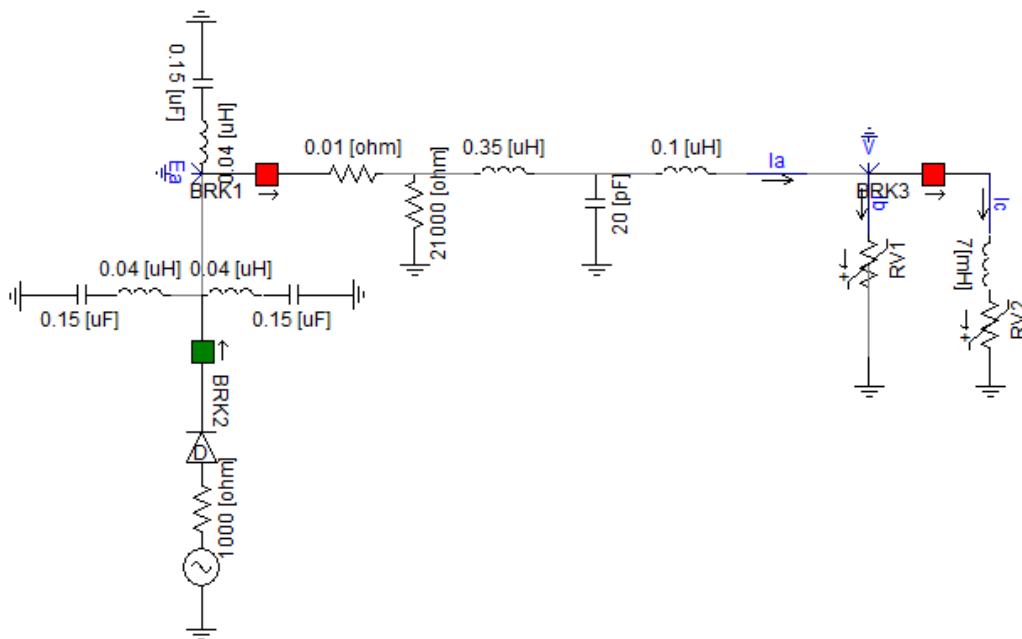


Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι η κρουστική γεννήτρια ρεύματος, ενώ το δεύτερο τμήμα είναι το ισοδύναμο κύκλωμα του ηλεκτροδίου και του εδάφους (χώματος).

Τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος έχουν τις εξής τιμές : $C_{s1} = C_{s2} = C_{s3} = 0.15 \mu\text{F}$, $L_{s1} = L_{s2} = L_{s3} = 0.04 \mu\text{H}$, $R_{\text{cir}} = 0.01 \Omega$, $L_{\text{cir}} = 0.35 \mu\text{H}$, $C_{\text{cir}} = 20 \text{ pF}$, $L_{\text{rod}} = 0.1 \mu\text{H}$, $L = 7 \text{ mH}$.

Στο πρόγραμμα PSCAD σχεδιάστηκε το αντίστοιχο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.2**.



Σχήμα 4.2 Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Τα μεγέθη που αφορούν στην AC γεννήτρια είναι: RMS τιμή 27 kV, συχνότητα 50 Hz.

Ο διακόπτης BRK1 αναπαριστά το σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας και κλείνει στα 10 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Ο διακόπτης BRK3 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού και κλείνει στα 10.06 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχουμε προσθέσει μία δίοδο κι ένα διακόπτη BRK2, ο οποίος ανοίγει στα

5 ms (αρχική κατάσταση: κλειστός), στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη φόρτιση της κρουστικής γεννήτριας.

Οι εμπειρικές εκφράσεις για τις τιμές των μεταβλητών αντιστάσεων R_1 (RV1 στο **Σχήμα 4.2**) και R_2 (RV2 στο **Σχήμα 4.2**) που προτείνονται [39] ανάλογα με την περιεκτικότητα του χώματος σε νερό (1%, 3%, 10%) είναι :

$$1\% : R_1 (\text{k}\Omega) = 16.9 * I^{-0.811} \quad \& \quad R_2 (\text{k}\Omega) = 17.61 * I^{-0.878} \quad (4.1)$$

$$3\% : R_1 (\text{k}\Omega) = 7.74 * I^{-0.551} \quad \& \quad R_2 (\text{k}\Omega) = 7.63 * I^{-0.865} \quad (4.2)$$

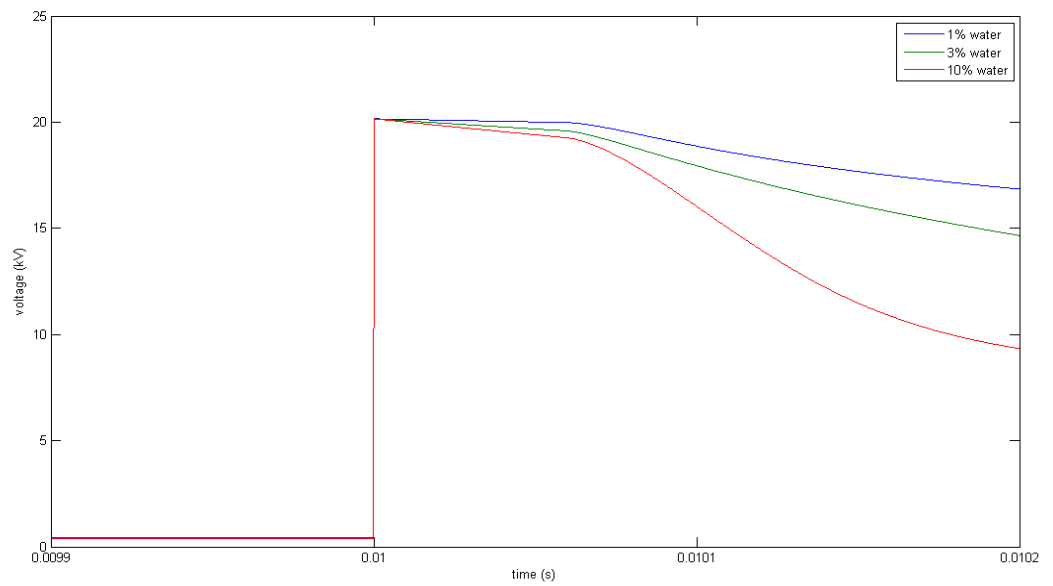
$$10\% : R_1 (\text{k}\Omega) = 5.492 * I^{-0.502} \quad \& \quad R_2 (\text{k}\Omega) = 6.323 * I^{-0.791} \quad (4.3)$$

Οι συντελεστές των τιμών για τις αντιστάσεις R_1 και R_2 έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε Ω τιμές.

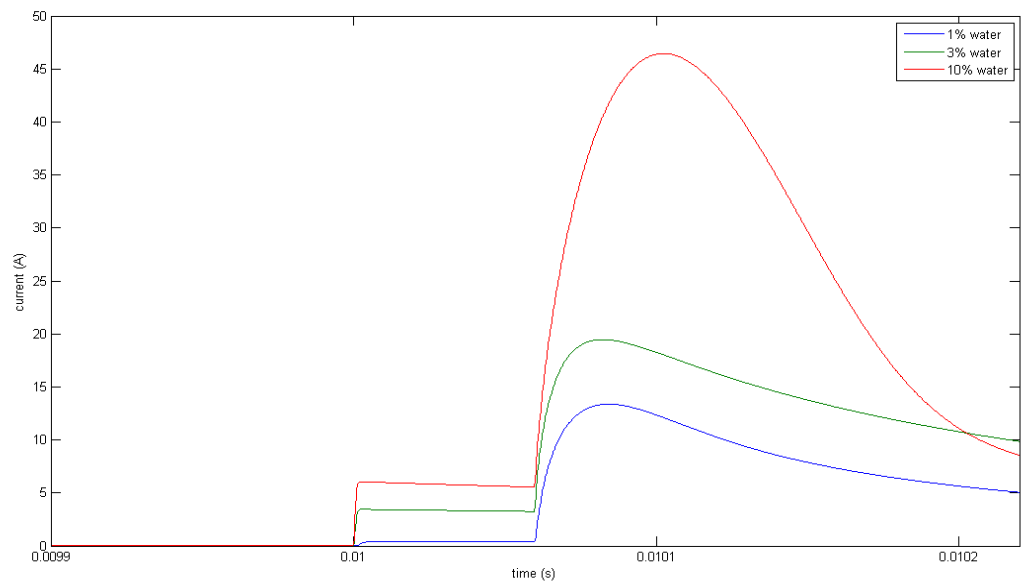
Όπως παρατηρούμε, η παράλληλη χωρητικότητα C_{sand} του **Σχήματος 4.1**. δεν υπάρχει στο **Σχήμα 4.2**. Αυτό συμβαίνει, διότι σύμφωνα με τους Nor et al [39] αυτή η χωρητικότητα δεν έχει επίδραση στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και συνεπώς μπορεί να μη ληφθεί υπόψη.

4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης - Παρατηρήσεις

Για καθεμιά από τις τρεις περιεκτικότητες της άμμου σε υγρασία παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (**Σχήματα 4.3 – 4.4**), όσον αφορά στα μεγέθη V και I_a . Τα μεγέθη αυτά έχουν οριστεί ως εξής: V είναι η διαφορά δυναμικού στον παράλληλο κλάδο που αποτελείται από τη R_1 , δηλαδή πριν το διακόπτη SW2 του **Σχήματος 4.1** και I_a είναι το ρεύμα που ρέει προς τον κλάδο με το στοιχείο L_{rod} . Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την προσομοίωση, σε καθένα από τα οποία απεικονίζονται και οι τρεις περιεκτικότητες σε νερό. (**Σχήματα 4.3 – 4.4**)



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα τάσης V - χρόνου



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ρεύματος I_a - χρόνου

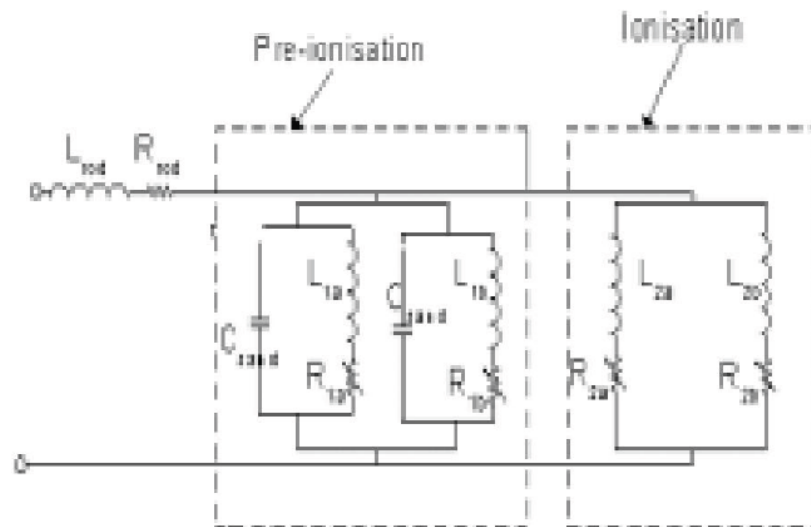
Από το **Σχήμα 4.3** διαπιστώνουμε ότι αύξηση της περιεκτικότητας οδηγεί τη διαφορά δυναμικού V , αφού φτάσει στη μέγιστη τιμή της, να μειώνεται με πιο γρήγορο και απότομο ρυθμό., καθώς η αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται. Μάλιστα, ο ρυθμός αυτός μεταβάλλεται μετά την ενεργοποίηση του διακόπτη

BRK3, οπότε η συνολική αντίσταση του φορτίου μειώνεται με αποτέλεσμα τη μεταβολή του χρόνου εκφόρτισης της κρουστικής γεννήτριας.

Από το **Σχήμα 4.4** παρατηρούμε ότι αύξηση της περιεκτικότητας του χώματος σε νερό οδηγεί σε μείωση της αντίστασης του δοκιμίου και συνεπώς σε αύξηση του ρεύματος για δεδομένο επίπεδο φόρτισης στην εκδήλωση του φαινομένου, που υλοποιείται μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη BRK3. Έτσι, τη χρονική στιγμή $t = 10.06 \text{ ms}$ που κλείνει ο BRK3 η συνολική αντίσταση μειώνεται, με αποτέλεσμα το ρεύμα να αυξάνεται. Η ύπαρξη της δεύτερης κορυφής σε αυτό το διάγραμμα οφείλει την παρουσία της στις δύο αντιστάσεις: την προ-ιονισμού αντίσταση R_1 και τη μετά-ιονισμού αντίσταση R_2 .

4.1.3 Βελτιωμένο κυκλωματικό μοντέλο

Στη συνέχεια της εργασίας μας, δημιουργήσαμε στο PSCAD το βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα, που φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**.

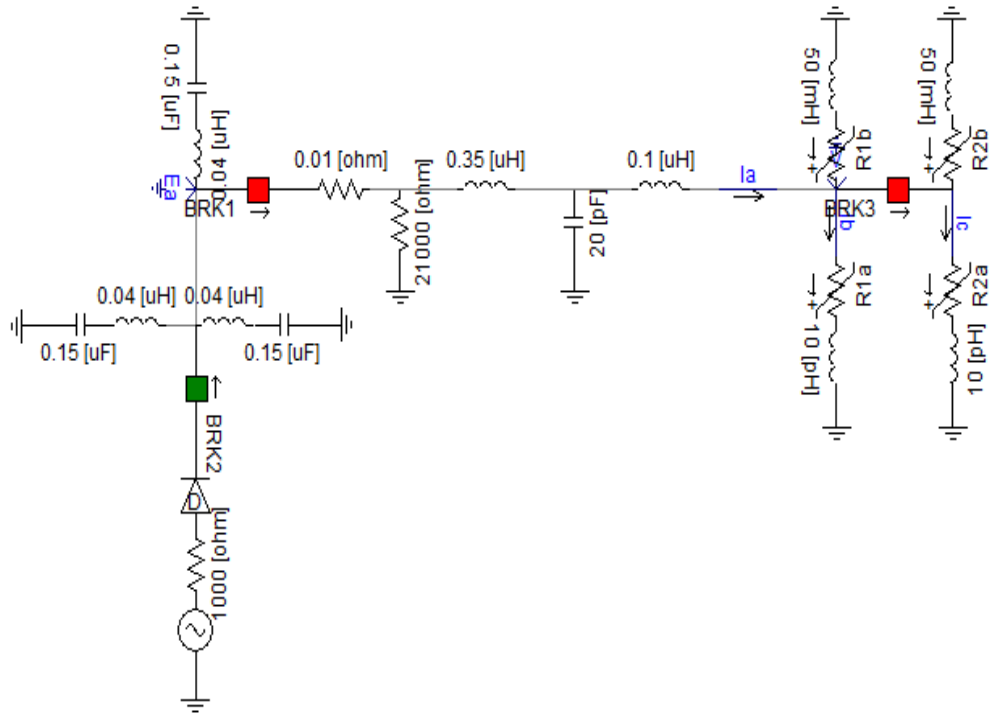


Σχήμα 4.5 Βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

Τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος έχουν τις εξής τιμές : $C_{s1} = C_{s2} = C_{s3} = 0.15 \mu\text{F}$, $L_{s1} = L_{s2} = L_{s3} = 0.04 \mu\text{F}$, $R_{\text{cir}} = 0.01 \Omega$, $L_{\text{cir}} = 0.35 \mu\text{H}$, $C_{\text{cir}} = 20 \text{ pF}$, $L_{\text{rod}} = 0.1 \mu\text{H}$, $L_{1a} = 10 \text{ pH}$, $L_{1b} = 50 \text{ mH}$, $L_{2a} = 10 \text{ pH}$, $L_{2b} = 50 \text{ mH}$.

Για τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος ισχύουν τα ίδια που περιγράψαμε παραπάνω στην **Παράγραφο 4.1.1**.

Στο πρόγραμμα PSCAD το αντίστοιχο κύκλωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.6**.



Σχήμα 4.6 Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Οι εμπειρικές εκφράσεις για τις τιμές των μεταβλητών αντιστάσεων R_{1a} , R_{1b} , R_{2a} και R_{2b} για 3% περιεκτικότητα του χώματος σε νερό που προτείνονται [40] είναι :

$$R_{1a} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.74 * I^{-0.551} * 10 \quad (4.4)$$

$$R_{1b} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.74 * I^{-0.551} * 0.53 \quad (4.5)$$

$$R_{2a} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.63 * I^{-0.65} * 10 \quad (4.6)$$

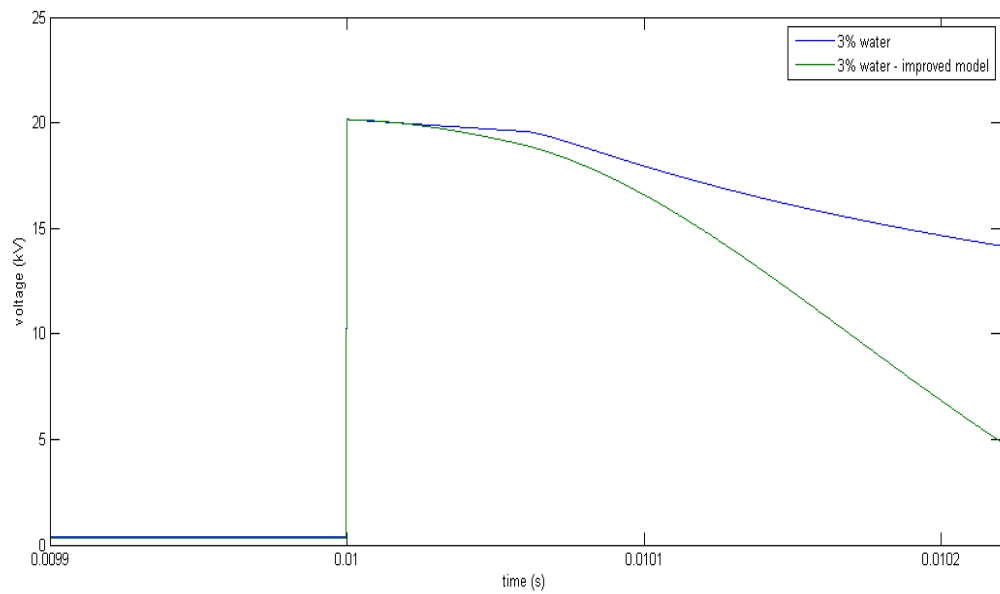
$$R_{2b} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.63 * I^{-0.65} * 0.53 \quad (4.7)$$

Όπως και πριν, οι συντελεστές των τιμών για τις αντιστάσεις R_{1a} , R_{1b} , R_{2a} και R_{2b} έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε Ω τιμές.

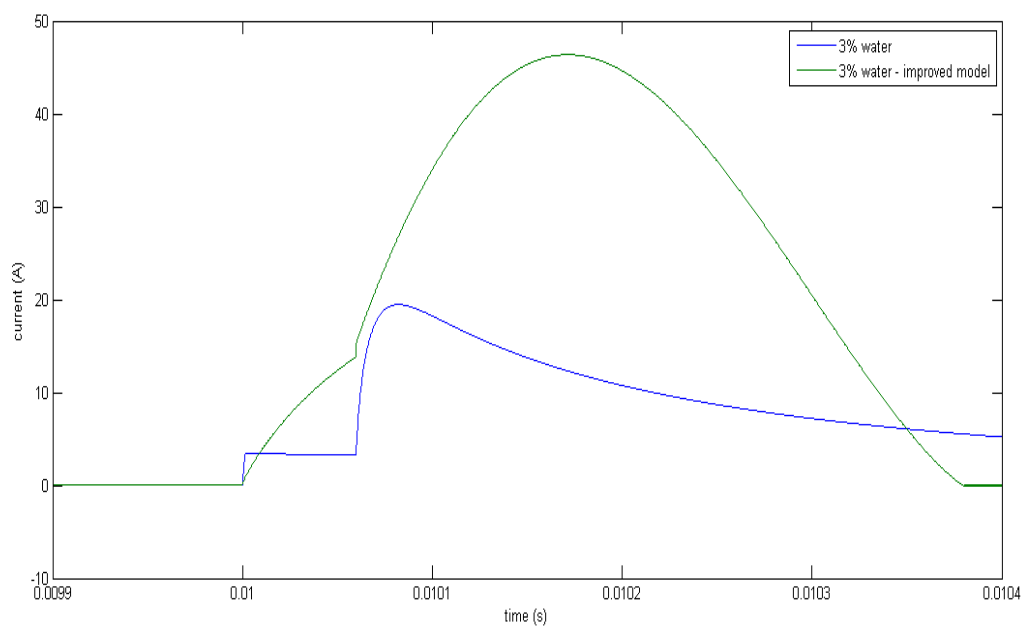
Επίσης, οι παράλληλες χωρητικότητες C_{sand} δεν έχουν επίδραση [40] στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και γι' αυτό δεν υπάρχουν στο **Σχήμα 4.6**.

4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης βελτιωμένου κυκλωματικού μοντέλου - Παρατηρήσεις

Ακολουθώς παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στα μεγέθη V και I_a (Σχήματα 4.7 – 4.8), για περιεκτικότητα του χώματος σε νερό 3% του απλού προτεινόμενου ισοδύναμου κυκλώματος σε συνδυασμό με αυτά του βελτιωμένου ισοδύναμου κυκλώματος του ιονισμού του εδάφους.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα τάσης V - χρόνου



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα ρεύματος I_a - χρόνου

Αρχικά, πρέπει να αναφερθούμε στην επιλογή των τιμών των μεταβλητών αντιστάσεων. Η R_{1a} είναι παράλληλη με τη R_{1b} , και ομοίως η R_{2a} με τη R_{2b} . Προκειμένου η χρονική καθυστέρηση να εξαρτάται από το πλάτος της τάσης, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών R_{1a} και R_{1b} , καθώς και των R_{2a} και R_{2b} , έτσι ώστε ο ένας κλάδος να μεταφέρει υψηλότερα πλάτη ρεύματος από τον άλλο. Μία χαμηλή τιμή αυτεπαγωγής τοποθετείται σε σειρά με την αντίσταση που έχει μεγάλο πλάτος ρεύματος. Η R_{1b} και R_{2b} ανήκουν στον κλάδο υψηλού πλάτος, επομένως οι αυτεπαγωγές L_{1b} και L_{2b} θα πρέπει να έχουν χαμηλότερη τιμή από τις L_{1a} και L_{2a} . Έτσι θα πρέπει να προσδιοριστούν οι λόγοι μεταξύ των R_{1a} και R_{1b} , καθώς και των R_{2a} και R_{2b} , έτσι ώστε η αντίσταση του κάθε τμήματος να έχει περισσότερα μη γραμμικά χαρακτηριστικά από την άλλη. Με εμπειρικό τρόπο προέκυψαν οι σχέσεις (4.4) – (4.7) που αναφέραμε.

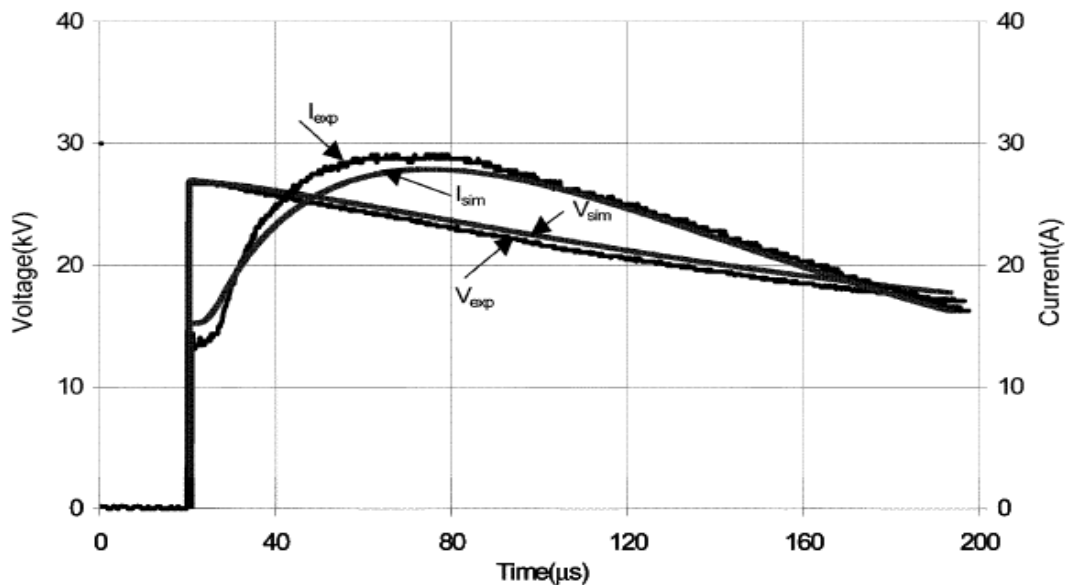
Ακολουθώντας, θα σχολιάσουμε την επιλογή των τιμών των αυτεπαγωγών L_{1a} , L_{1b} , L_{2a} και L_{2b} , οι οποίες είναι σε σειρά με τις αντιστάσεις R_{1a} , R_{1b} , R_{2a} και R_{2b} αντίστοιχα. Βέβαια, όπως είναι γνωστό, είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε την τιμή μη γραμμικής αυτεπαγωγής, που να προσομοιώνει ορθά την επίδραση των πλατών της τάσης και του ρεύματος στο χρόνο της κορυφής του ρεύματος. Έτσι, χαμηλές τιμές αυτεπαγωγών (L_{1a} και L_{2a}) συνδέονται με τις μη γραμμικές αντιστάσεις (R_{1a} και R_{2a}), ενώ υψηλές τιμές αυτεπαγωγών (L_{1b} και L_{2b}) με τις σχεδόν γραμμικές αντιστάσεις (R_{1b} και R_{2b}), ώστε να λάβουν υπόψη την χρονική καθυστέρηση στο ρεύμα. Εδώ [40] οι τιμές των αυτεπαγωγών βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα, ώστε οι χρονικές καθυστερήσεις στο ρεύμα να εξαρτώνται από τα επίπεδα τάσης. Για να πετύχουμε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των εμπειρικών αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από την προσομοίωση οι L_{1a} και L_{2a} έχουν την τιμή 10 μH , ενώ οι L_{1b} και L_{2b} πρέπει να έχουν τιμή περισσότερο από 1000 φορές μεγαλύτερη από τις L_{1a} και L_{2a} και θα έχουν τιμή 50 mH. Αυτές οι τιμές των αυτεπαγωγών παρέμεναν σταθερές σε όλες τις προσομοιώσεις του βελτιωμένου ισοδύναμου κυκλώματος του ιονισμού του εδάφους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν μόνο περιεκτικότητα χώματος σε νερό 3%. Για άλλα ποσοστά περιεκτικότητας οι τιμές των

αυτεπαγωγών παραμένουν σταθερές (L_{1a} , L_{1b} , L_{2a} και L_{2b}), ενώ οι τιμές των αντιστάσεων (R_{1a} , R_{1b} , R_{2a} και R_{2b}) διαφοροποιούνται.

Παρατηρώντας τα **Σχήματα 4.7 – 4.8**, βλέπουμε μια πιο ομαλή μεταβολή της τάσης και του ρεύματος στο βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα συγκρινόμενο με το απλό ισοδύναμο κύκλωμα. Οι χρόνοι για την πρώτη και δεύτερη κορυφή του ρεύματος εξαρτώνται από το πλάτος της τάσης ή από τα ρεύματα εκφόρτισης. Αυτές οι χρονικές καθυστερήσεις έχουν βρεθεί ότι μειώνονται αυξάνοντας τα επίπεδα τάσης ή ρεύματος.

4.2 Γενικές παρατηρήσεις – Σχόλια

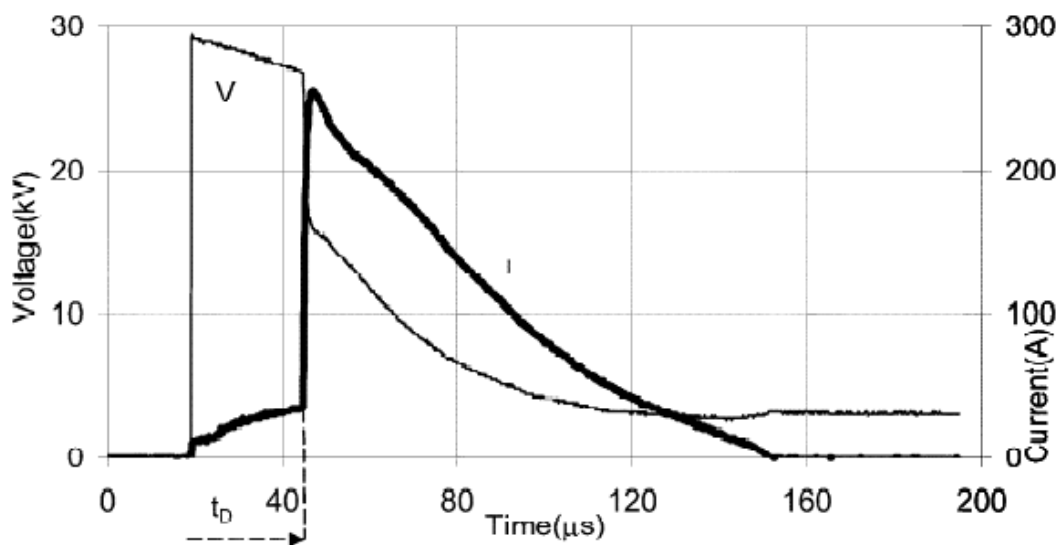
Στο άρθρο τους [39] οι μελετητές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μόνο για περιεκτικότητα χώματος σε νερό 3%, που φαίνονται στο ακόλουθο **Σχήμα 4.9**.



Σχήμα 4.9 Κοινό διάγραμμα τάσης V και ρεύματος I_a – χρόνου [39]

Όπως παρατηρούμε, τα δικά μας διαγράμματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (**Σχήματα 4.3 – 4.4**) έχουν την ίδια ακριβώς μορφή με αυτά των μελετητών (**Σχήμα 4.9**), καθώς επίσης και αντίστοιχες μονάδες στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.

Ερευνώντας τα χαρακτηριστικά του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους και μετρώντας την τιμή της μετά-ιονισμού αντίστασης, η τάση φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας αυξήθηκε με μικρά βήματα. Μετά από ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, πλήρης κατάρρευση μεταξύ του ενεργού ηλεκτροδίου και του δοχείου χώματος συμβαίνει διαμέσου του δοκιμίου. Αυτό παρατηρείται στα αποτελέσματα για την τάση και το ρεύμα, στα οποία, σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t_D κοντά στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, μία απότομη μεγάλη αύξηση στο ρεύμα συνοδεύεται από μία πτώση στην τάση, υποδηλώνοντας τη στιγμή της κατάρρευσης. Με άλλα λόγια, η γραφική παράσταση του ρεύματος εμφανίζει μία δεύτερη κορυφή, ενώ η τάση εξακολουθεί να μειώνεται ομαλά. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στα δικά μας αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (Σχήματα 4.3 – 4.4). Αντιστοίχως, οι μελετητές [39] παραθέτουν το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 4.10), στο οποίο φαίνονται αυτά που μόλις αναφέραμε, όταν συμβαίνει η κατάρρευση, καθώς και ο χρόνος t_D .



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα τάσης V και ρεύματος I_a – χρόνου όταν συμβαίνει η κατάρρευση [39]

Προσεκτικότερη εξέταση της γραφικής παράστασης του ρεύματος αποκαλύπτει μία αρχική κορυφή, που αντιστοιχεί στην R_1 , που ακολουθείται από μία δεύτερη αύξηση στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, που αντιστοιχεί στην R_2 , και είναι σε

αυτήν τη δεύτερη κορυφή του ρεύματος που συμβαίνει η κατάρρευση. Είναι πλέον αποδεκτό ότι η δεύτερη κορυφή του ρεύματος προκαλείται από τον ιονισμό του εδάφους. Όπως φαίνεται, αυτή η δεύτερη κορυφή συμβαίνει μετά από κάποια χρονική καθυστέρηση. Ο χρόνος για την κατάρρευση t_D μπορεί να μετρηθεί κι έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τις τάσεις και την αγωγιμότητα του χώματος. Αυτό είναι παρόμοιο με το αποτέλεσμα στο οποίο κατέληξαν οι Cabrera et al [44], που βρήκαν ότι ο χρόνος t_D αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και μειώνεται με την τάση κατάρρευσης.

Επιπρόσθετα, πρέπει να αναφέρουμε ότι ο χρονοισμός των διακοπών και συγκεκριμένα του BRK3 έχει πραγματοποιηθεί κατά τέτοιον τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα κυκλωματικά μοντέλα να συμπίπτουν με τα πειραματικά αποτελέσματα [39]-[40].

Τελειώνοντας θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στην ανάλυση και στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου, όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους, δε μοντελοποιείται η φάση του απιονισμού του φαινομένου. Όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 4.5** με το βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα, υψηλές αυτεπαγωγές (L_{1b} και L_{2b}) είναι σε σειρά με τις R_{1b} και R_{2b} για να αναπαραστήσουν το στάδιο προ-ιονισμού που μεταφέρει χαμηλά πλάτη ρεύματος, ενώ χαμηλές αυτεπαγωγές (L_{1a} και L_{2a}) είναι σε σειρά με τις R_{1a} και R_{2a} για να αναπαραστήσουν το στάδιο ιονισμού που μεταφέρει υψηλά πλάτη ρεύματος. Στην περιοχή απιονισμού η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της. Στην ανάλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω αυτή η φάση του φαινομένου θεωρείται αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη.

Συνοψίζοντας πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα σύστημα με ηλεκτρόδιο γείωσης χρησιμοποιήθηκε για να ερευνηθεί τη μη γραμμική συμπεριφορά του φαινομένου του ιονισμού για διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό. Όταν υγρό χώμα υπόκειται σε γρήγορα κρουστικά ρεύματα, η αντίστασή του μειώνεται, καθώς αυξάνουν τα πλάτη του ρεύματος. Αυτό οφείλεται σε δύο ξεχωριστές φάσεις αγωγιμότητας, όταν το πλάτος του ρεύματος αυξάνεται. Πρώτον, θερμικές επιδράσεις εξαιτίας της ροής του ρεύματος μειώνουν την αντίσταση

δεύτερον, πάνω από το κατώφλι ιονισμού η αντίσταση μειώνεται επιπλέον εξαιτίας των εκτεταμένων ζωνών ιονισμού. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση αποκάλυψε και μία δεύτερη κορυφή στη γραφική παράσταση του ρεύματος, όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους. Οι δύο αυτές κορυφές του ρεύματος αποτέλεσαν τη βάση για την εισαγωγή δύο νέων παραμέτρων των χαρακτηριστικών του εδάφους κάτω από υψηλής έντασης γρήγορες κρουστικές συνθήκες. Αυτές είναι οι προ-ιονισμού και μετά-ιονισμού αντιστάσεις R_1 και R_2 αντίστοιχα, στις οποίες έχουμε αναφερθεί αναλυτικά παραπάνω.

Ασφαλώς, πρόσθετη υπολογιστική μελέτη χρειάζεται σε συνδυασμό με νέες κυκλωματικές προσομοιώσεις, έτσι ώστε να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα για τις διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό και να καταλήξουμε σε σαφή συμπεράσματα σχετικά με όλες τις παραμέτρους που ορίζουν πλήρως το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά δεδομένα – Κυκλωματική προσομοίωση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, όσον αφορά στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και κατόπιν γίνεται σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος.

5.1 Ανάλυση των τιμών των αντιστάσεων R_1 και R_2

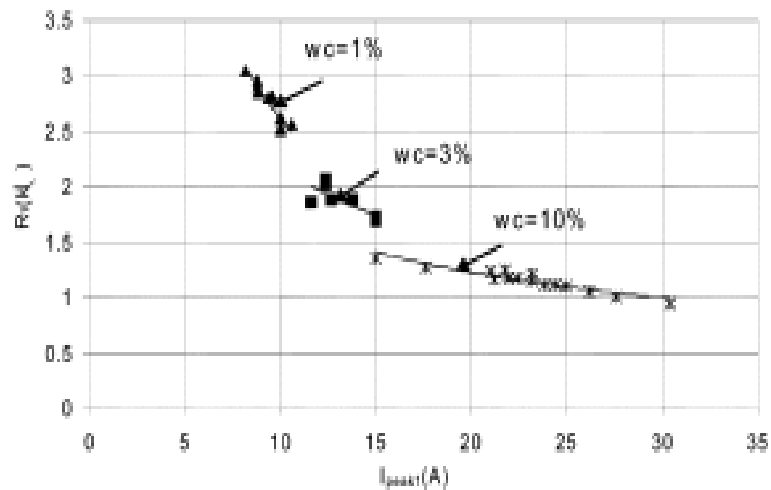
Όπως αναλύθηκε στο **Κεφάλαιο 4**, η ύπαρξη της δεύτερης κορυφής στη γραφική παράσταση του ρεύματος οδήγησε στον ορισμό δύο αντιστάσεων, οι οποίες είναι η προ-ιονισμού αντίσταση R_1 και η μετά-ιονισμού αντίσταση R_2 . Οι τιμές των αντιστάσεων αυτών μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τις δύο κορυφές του ρεύματος και τις αντίστοιχες στιγμιαίες τιμές της τάσης. Ο συγκεκριμένος τρόπος μέτρησης της τιμής των αντιστάσεων επιλέγεται ώστε να απαλειφθεί κάθε επαγωγική επίδραση στο δείγμα χώματος, καθώς τη στιγμή της κορυφής του ρεύματος ισχύει $di/dt = 0$. Οι σχέσεις (5.1)-(5.2) που ακολουθούν εκφράζουν τους μαθηματικούς ορισμούς των αντιστάσεων R_1 και R_2 [39]:

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \quad (5.1)$$

$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \quad (5.2)$$

- Αντίσταση προ-ιονισμού R_1 : Αντιστοιχεί στις ιδιότητες του χώματος χωρίς την πρόσθετη επίδραση του ιονισμού. Εκφράζει τη μη γραμμική αγωγή συμπεριφορά που ελέγχεται από τις θερμικές επιδράσεις και τη

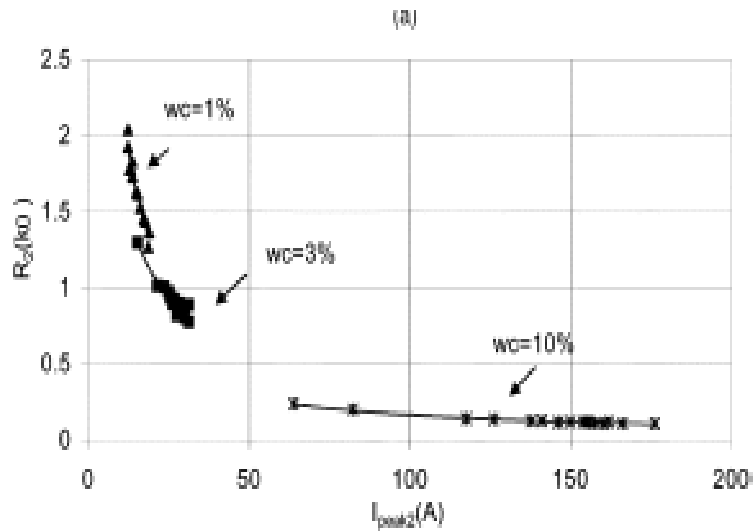
δομή του χώματος. Το **Σχήμα 5.1** που ακολουθεί δείχνει την προ-ιονισμού αντίσταση R_I για εδάφη με διάφορες περιεκτικότητες χώματος σε νερό [39]. Όπως φαίνεται, η R_I μειώνεται, καθώς η τιμή του πλάτους του ρεύματος αυξάνεται. Αυτή η μείωση στην τιμή της R_I καταδεικνύει μια πιθανή μη γραμμική αγωγή διαδικασία στο υγρό χόμα οφειλόμενη σε θερμικές επιδράσεις. Εξαιτίας της θερμικής ισχύος I^2R , η θερμοκρασία του χώματος αυξάνεται, πράγμα το οποίο οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας και συνεπώς σε μείωση της ειδικής αντίστασης του χώματος.



Σχήμα 5.1 Αντίσταση προ-ιονισμού R_I συναρτήσει του I_{peak1} [39]

- Αντίσταση μετά-ιονισμού R_2 : Αντιστοιχεί στην τελική φάση της αγωγικής συμπεριφοράς στην οποία το χόμα φτάνει, αφού η περιοχή ιονισμού έχει επεκταθεί στη μέγιστη τιμή της μέσα στο δείγμα χώματος. Η αντίσταση μετά-ιονισμού R_2 είναι πάντα μικρότερη από την προ-ιονισμού R_I . Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.2** που ακολουθεί, η αντίσταση R_2 (όπως και η R_I) μειώνεται με την αύξηση του πλάτους του ρεύματος. Αυτή η μείωση στην τιμή της R_2 είναι σαφώς πιο σημαντική σε έδαφος με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (είναι χόμα με μεγάλη ειδική αντίσταση). Η αντίσταση R_2 ελέγχεται από τη διαδικασία ιονισμού που εξαπλώνεται από

το ενεργό ηλεκτρόδιο, αυξάνοντας έτσι την ακτίνα του ηλεκτροδίου και συνεπώς μειώνοντας την αντίσταση.

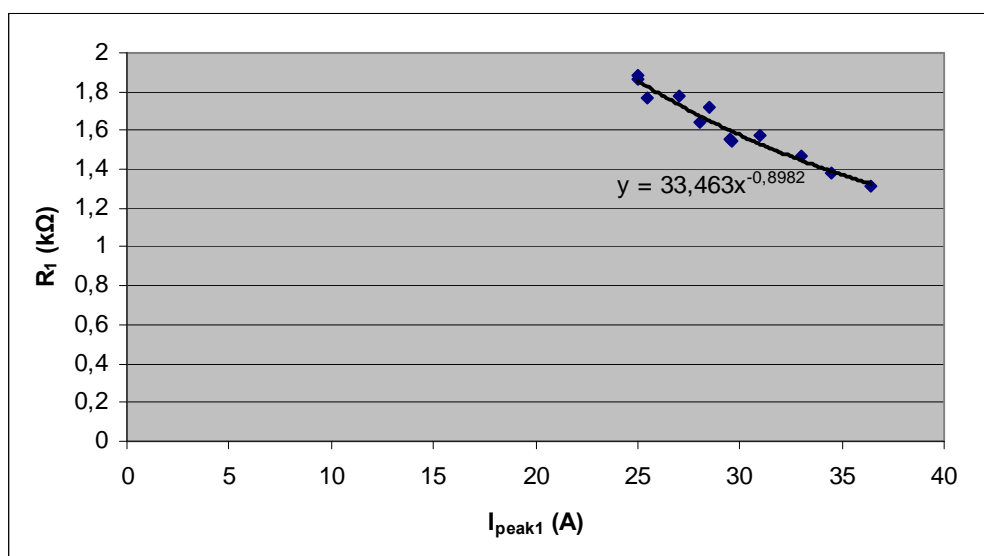


Σχήμα 5.2 Αντίσταση μετά-ιονισμού R_2 συναρτήσει του I_{peak2} [39]

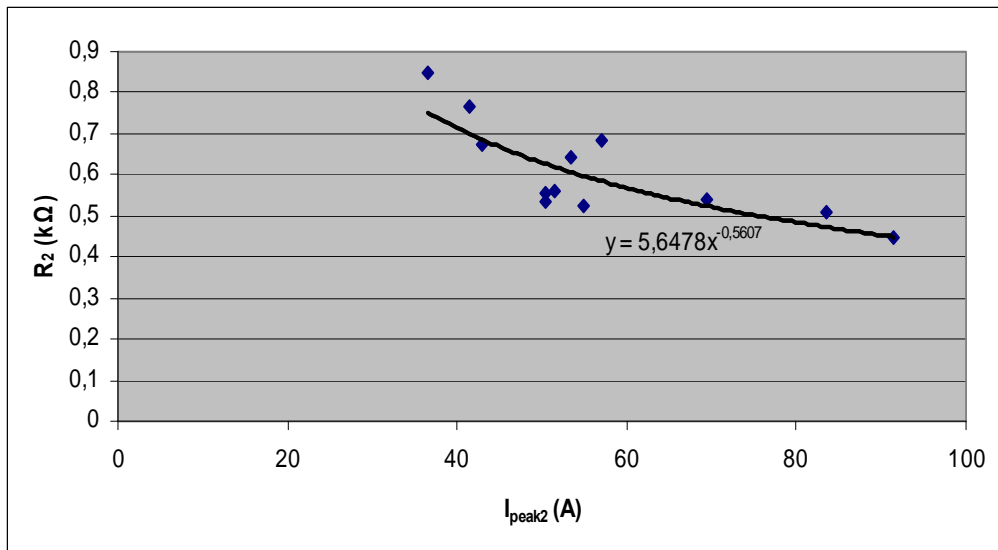
Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος για δείγμα χώματος Α, με υγρασία 5% και θετική πολικότητα παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Α**. Από κάθε παλμογράφημα καταγράφηκαν οι τιμές για τις δύο κορυφές του ρεύματος και οι αντίστοιχες τιμές της τάσης. Έτσι υπολογίστηκαν οι μαθηματικές εκφράσεις για τις αντιστάσεις R_1 και R_2 από τις σχέσεις (5.1)-(5.2). Στον **Πίνακα 5.1** φαίνονται οι τιμές για τα μεγέθη V_{peak1} , I_{peak1} , V_{peak2} , I_{peak2} , R_1 και R_2 , οι οποίες προσδιορίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 5.3 – 5.4** παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των αντιστάσεων R_1 και R_2 συναρτήσει των κορυφών του ρεύματος I_{peak1} και I_{peak2} . Όπως φαίνεται, οι τιμές των αντιστάσεων αυτών που προέκυψαν από τα πειράματα μειώνονται με την αύξηση του πλάτους του ρεύματος, σε πλήρη αντιστοιχία με αυτά που έχουν προταθεί στη θεωρία.

V_{peak1} (kV)	I_{peak1} (A)	V_{peak2} (kV)	I_{peak2} (A)	R_1 (k Ω)	R_2 (k Ω)
47	25	31,9	41,5	1,88	0,768675
46,6	25	26,9	50,5	1,864	0,532673
48	27	34,5	53,5	1,777778	0,64486
46	28	28,8	55	1,642857	0,523636
45,9	29,6	39,1	57	1,550676	0,685965
46	29,5	27,9	50,4	1,559322	0,553571
49,1	28,5	29	43	1,722807	0,674419
48	36,4	41	91,5	1,318681	0,448087
48,7	31	28,85	51,5	1,570968	0,560194
45	25,5	30,9	36,5	1,764706	0,846575
48,4	33	37,5	69,5	1,466667	0,539568
47,6	34,5	42,4	83,5	1,37971	0,507784

Πίνακας 5.1 Τιμές για τα μεγέθη V_{peak1} , I_{peak1} , V_{peak2} , I_{peak2} , R_1 και R_2 από τα πειραματικά δεδομένα



Σχήμα 5.3 Αντίσταση προ-ιονισμού R_1 συναρτήσει του I_{peak1} υπολογιζόμενη από τα πειραματικά δεδομένα



Σχήμα 5.4 Αντίσταση μετά-ιονισμού R_2 συναρτήσει του I_{peak2} υπολογιζόμενη από τα πειραματικά δεδομένα

$$\text{Συνεπώς } R_1 = 33,463 * I^{-0,8982} \quad (5.3)$$

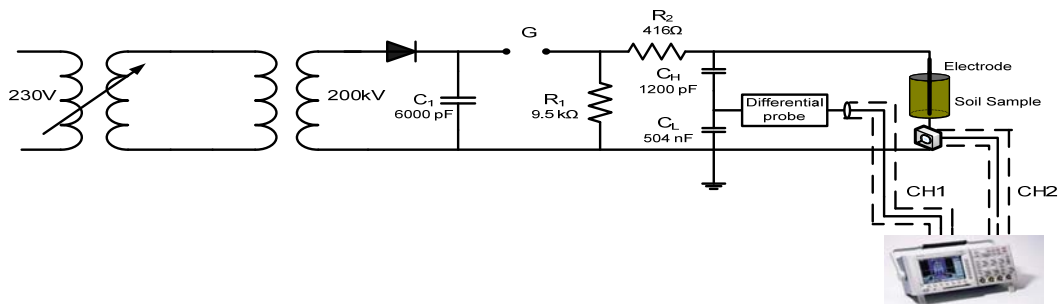
$$\text{και } R_2 = 5,6478 * I^{-0,5607} \quad (5.4)$$

Οι τιμές αυτές των αντιστάσεων θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του κυκλώματος, που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

5.2 Περιγραφή του κυκλώματος - Αποτελέσματα

5.2.1 Κυκλωματικό μοντέλο

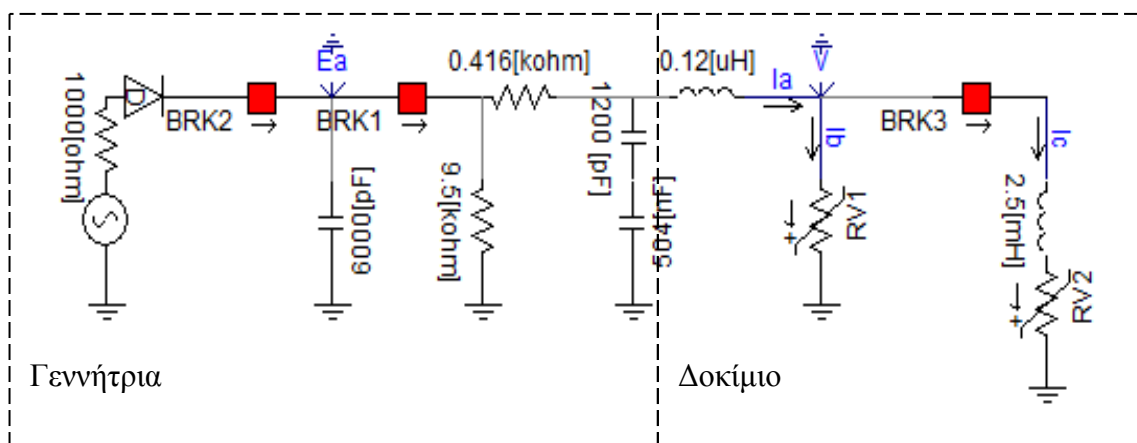
Αρχικά, δημιουργήσαμε στο PSCAD το ακόλουθο σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης, που έχει παρουσιαστεί στο **Κεφάλαιο 3** και φαίνεται στο **Σχήμα 5.5**.



Σχήμα 5.5 Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος έχουν τις εξής τιμές : $C_1 = 6000 \text{ pF}$, $R_1 = 9.5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 416 \text{ }\Omega$, $C_H = 1200 \text{ pF}$, $C_L = 504 \text{ nF}$, $L_{\text{rod}} = 0.12 \text{ }\mu\text{H}$, $L = 2.5 \text{ mH}$.

Στο πρόγραμμα PSCAD σχεδιάστηκε το αντίστοιχο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.6**.



Σχήμα 5.6 Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.6**, έχουν προστεθεί δύο επαγωγικά στοιχεία για την προσομοίωση του κυκλώματος.

Ο υπολογισμός της τιμής για το επαγωγικό στοιχείο L_{rod} έγινε με βάση τον τύπο

$$(5.5) [45]: L_{\text{rod}} = \frac{\mu_o * l}{2\pi} \ln(4l/a - 1) \quad (5.5)$$

όπου $l = 14 \text{ cm}$, το μήκος του ηλεκτροδίου

$a = 2.5 \text{ mm}$ η διατομή του ηλεκτροδίου

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές προκύπτει: $L_{\text{rod}} = 0.12 \text{ }\mu\text{H}$

Η επιλογή της τιμής για το στοιχείο L έγινε με πρακτικό τρόπο. Συγκεκριμένα, κατόπιν δοκιμών επιλέχτηκε η τιμή 2.5 mH , ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα πειραματικά.

Οι R_1 και R_2 , που έχουν προκύψει από τα πειραματικά αποτελέσματα, εκφράζονται από τις σχέσεις (5.3)-(5.4) και οι συντελεστές τους έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε Ω τιμές.

Το κυκλωματικό μοντέλο αυτό προσομοιώθηκε δύο φορές. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τάση πρωτεύοντος 55 V (τάση δευτερεύοντος 50 kV), ενώ η δεύτερη για τάση πρωτεύοντος 60.6 V (τάση δευτερεύοντος 55 kV).

Αναλυτικότερα για την πρώτη περίπτωση θεωρήσαμε τα ακόλουθα:

Τα μεγέθη που αφορούν στην AC γεννήτρια είναι: RMS τιμή 50 kV, συχνότητα 50 Hz.

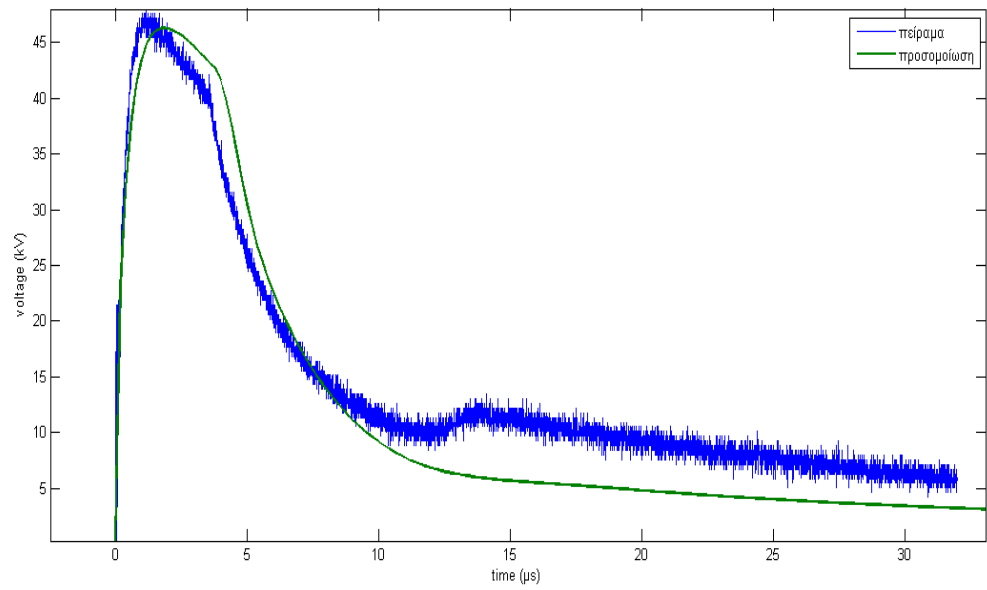
Όπως είπαμε στο **Κεφάλαιο 4**, ο διακόπτης BRK1 αναπαριστά το σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας και κλείνει στα 15 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Ο διακόπτης BRK3 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού και κλείνει στα 15.0036 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχουμε προσθέσει μία δίοδο κι ένα διακόπτη BRK2, ο οποίος ανοίγει στα 10 ms (αρχική κατάσταση: κλειστός), στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη φόρτιση της κρουστικής γεννήτριας· η λειτουργία τους όμως δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Για τη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω, διαφοροποιώντας την RMS τιμή της AC γεννήτριας, που τώρα προσδιορίστηκε ίση με 55 kV και τη χρονική στιγμή που κλείνει ο διακόπτης BRK3, που τέθηκε στα 15.0027 ms.

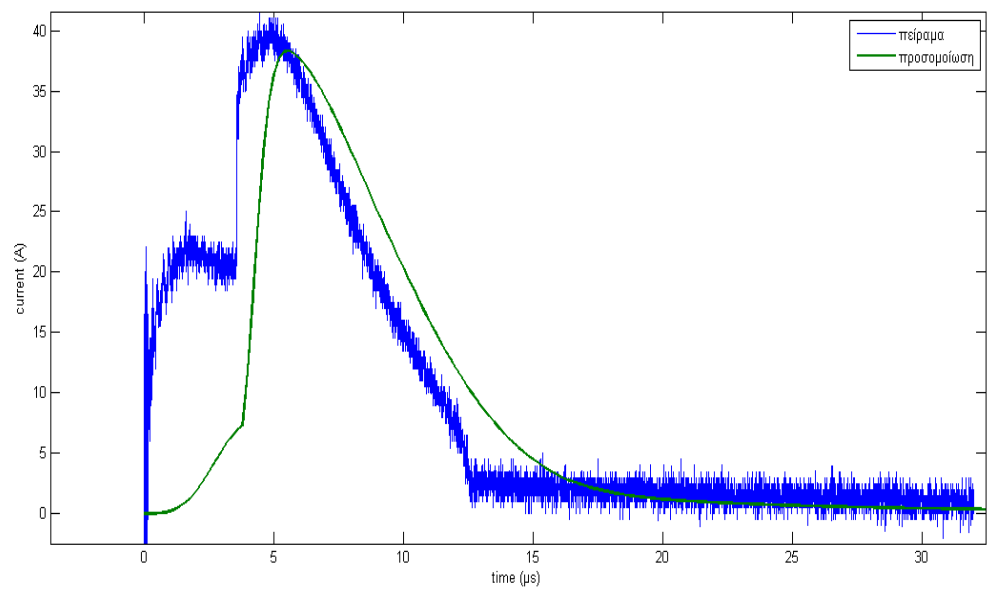
5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης - Παρατηρήσεις

Για καθεμιά από τις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στα μεγέθη V και I_a . Στα ίδια διαγράμματα (**Σχήματα 5.7 – 5.10**) απεικονίζονται και τα πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Για την πρώτη περίπτωση (τάση φόρτισης 50 kV):

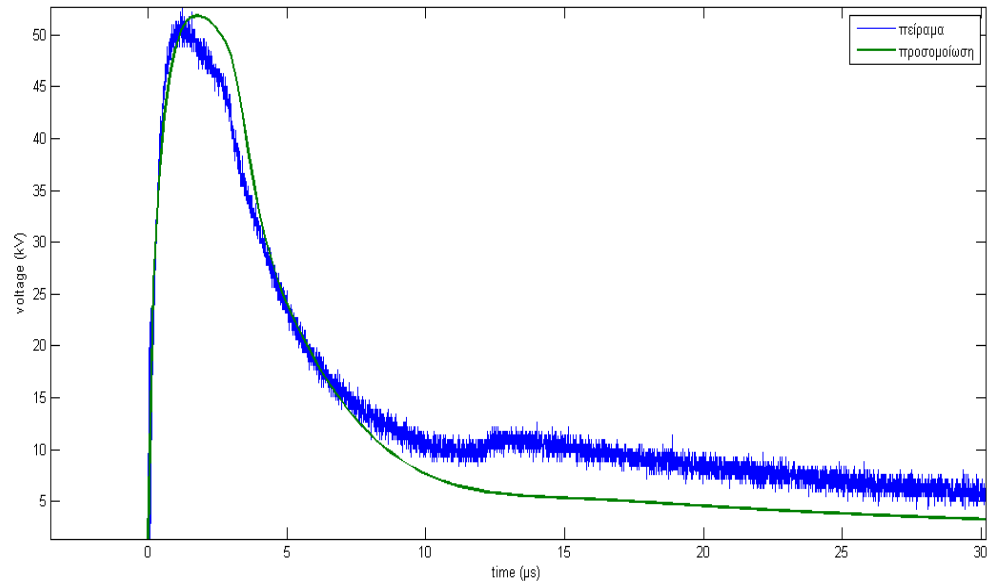


Σχήμα 5.7 Διάγραμμα τάσης V - χρόνου για τάση φόρτισης 50 kV

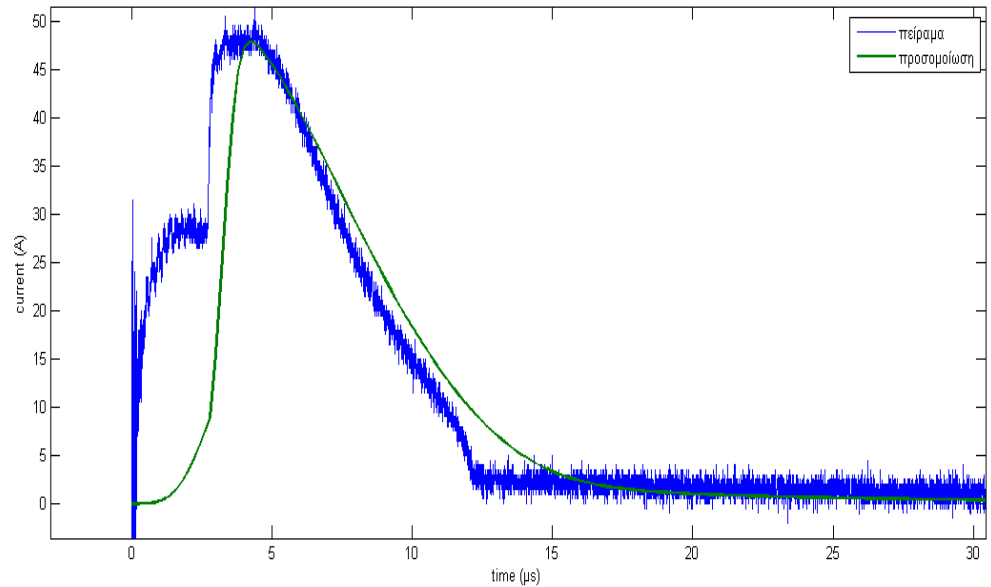


Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ρεύματος I_a - χρόνου για τάση φόρτισης 50 kV

Για τη δεύτερη περίπτωση (τάση φόρτισης 55 kV):



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα τάσης V - χρόνου για τάση φόρτισης 55 kV



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα ρεύματος I_a - χρόνου για τάση φόρτισης 55 kV

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανής η αντιστοιχία στη μορφή των γραφικών παραστάσεων τάσης και ρεύματος μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης τόσο για την τιμή της κορυφής όσο και για την αντίστοιχη τιμή του χρόνου, θεωρώντας σωστή την τιμή από το πείραμα και λανθασμένη την τιμή από την προσομοίωση. Ο υπολογισμός γίνεται με τον τύπο (5.6) που ακολουθεί:

$$\pi(\%) = (\text{Λάθος τιμή} - \text{Σωστή τιμή}) / \text{Σωστή τιμή} \quad (5.6)$$

Για την πρώτη περίπτωση (τάση φόρτισης 50 kV):

	V_{peak}	t	I_{peak2}	t_2
Σχετικό σφάλμα π (%)	-3,13%	50%	-7,23%	4,85%

Πίνακας 5.2 Σχετικά σφάλματα (%) για τα μεγέθη V_{peak} , t, I_{peak2} και t_2 μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τάση φόρτισης 50kV

Για τη δεύτερη περίπτωση (τάση φόρτισης 55 kV):

	V_{peak}	t	I_{peak2}	t_2
Σχετικό σφάλμα π (%)	-1,14%	44%	-6,08%	-3,41%

Πίνακας 5.3 Σχετικά σφάλματα (%) για τα μεγέθη V_{peak} , t, I_{peak2} και t_2 μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τάση φόρτισης 55kV

Στα διαγράμματα τάσης (**Σχήματα 5.7, 5.9**) παρατηρείται μια πολύ μικρή διαφοροποίηση της μέγιστης τιμής για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σχέση με τα πειραματικά, όπως φαίνεται και από τις τιμές του σφάλματος. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα στοιχεία της προσομοίωσης θεωρούνται ιδανικά. Αντίθετα, στην πειραματική διάταξη υπάρχουν πτώσεις τάσης πάνω στα στοιχεία, ο μετασχηματιστής δεν είναι ιδανικός και ο σπινθηριστής προσομοιώνεται ως διακόπτης, του οποίου ο χρόνος λειτουργίας έχει οριστεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε η προσομοίωση να προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Όσον αφορά στο χρόνο, στον οποίο οι μέγιστες τιμές συμβαίνουν, παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες ότι η διαφοροποίηση είναι κάπως μεγαλύτερη. Τη στιγμή λειτουργίας του διακόπτη BRK3 η τάση μειώνεται απότομα, γεγονός που συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα. Θα πρέπει να σχολιάσουμε το γεγονός ότι ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη BRK3 ήταν διαφορετικός για τις δύο περιπτώσεις, πράγμα που αποτελεί αδυναμία της

συγκεκριμένης μοντελοποίησης. Παρά το γεγονός αυτό, η ομοιότητα στη μορφή των γραφικών παραστάσεων έχει επιτευχθεί και μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Από τα διαγράμματα ρεύματος (Σχήματα 5.8, 5.10) παρατηρείται μία αρχική κορυφή, που αντιστοιχεί στην R_1 , που ακολουθείται από μία δεύτερη αύξηση στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, που αντιστοιχεί στην R_2 τόσο στα πειραματικά δεδομένα όσο και στις προσομοιώσεις. Βέβαια, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στην τιμή της πρώτης κορυφής καθώς και στους αντίστοιχους χρόνους, γεγονός που υπογραμμίζει την αδυναμία της συγκεκριμένης προσέγγισης του φαινομένου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι έχουν αμεληθεί παράσιτες αυτεπαγωγές και χωρητικότητες, αλλά και η χωρητικότητα του δοκιμίου, η οποία σύμφωνα με τους Nor et al [39]-[40] δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ενδεχομένως, να απαιτείται διαφορετική προσομοίωση της κρουστικής γεννήτριας σε ότι αφορά στην ενέργεια που παράγει. Η διαφοροποίηση στην τιμή της δεύτερης κορυφής του ρεύματος, καθώς και στο χρόνο στον οποίο συμβαίνει, είναι πολύ μικρή.

Συνοψίζοντας πρέπει να αναφέρουμε ότι στα διαγράμματά μας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσεγγίζουν εκείνα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία με σχετικά ικανοποιητικό τρόπο, καθώς η απόλυτη ταύτιση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, που αφορούν στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, θεωρείται αδύνατη, αφού πρόκειται για ένα κατ' εξοχήν μεταβατικό φαινόμενο.

Κεφάλαιο 6

Η επόμενη μέρα

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζεται η ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε στη διπλωματική μας εργασία και σύμφωνα με την κατεύθυνση έρευνας που ανακύπτει μέσα από αυτήν αναφέρεται το επόμενο βήμα για μελλοντική διερεύνηση.

6.1 Σύνοψη – Μελλοντική διερεύνηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους σε συστήματα γείωσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PSCAD για την προσομοίωση των κυκλωματικών ισοδυνάμων που προτείνουν οι μελετητές [39]-[40]. Αρχικά, προσομοιώθηκε η λειτουργία του απλού κυκλώματος και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα για την τάση και το ρεύμα για διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό. Ακολούθως, αυτές οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος συγκρίθηκαν με αντίστοιχες κυματομορφές που προέκυψαν προσομοιώνοντας το βελτιωμένο κυκλωματικό μοντέλο που προτείνουν οι ίδιοι μελετητές. Το αποτέλεσμα δικαιώνει την πρόταση των ερευνητών όσον αφορά στο βελτιωμένο ισοδύναμο αλλά και τη δική μας επιμονή για επιβεβαίωση των όσων θεωρητικά έχουν προταθεί.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων με ένα δείγμα χώματος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και επίσης προσομοιώθηκε το κύκλωμα του Εργαστηρίου πάλι χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα PSCAD. Σκοπός μας ήταν να καταδείξουμε την αντιστοιχία και ομοιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από την κυκλωματική προσομοίωση στο πρόγραμμα PSCAD. Σε αυτήν την περίπτωση τα συμπεράσματα δεν ήταν τόσο ενθαρρυντικά όσο πριν. Ασφαλώς υπήρχε αντιστοιχία στη μορφή των γραφικών παραστάσεων,

όχι όμως σε τέτοιο βαθμό όσο αρχικά ελπίζαμε. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν από τη μια πλευρά ότι βρισκόμαστε σε καλό δρόμο, από την άλλη όμως ότι υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης.

Τελειώνοντας θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στην ανάλυση και στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου, όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους, δε μοντελοποιείται η φάση του απιονισμού του φαινομένου.

Πρόσθετη υπολογιστική μελέτη χρειάζεται σε συνδυασμό με νέες κυκλωματικές προσομοιώσεις, έτσι ώστε να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα για τις διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό και να καταλήξουμε σε σαφή συμπεράσματα σχετικά με όλες τις παραμέτρους που ορίζουν πλήρως το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη. Έτσι, στο μέλλον θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και άλλες σειρές πειραμάτων με περισσότερα δείγματα χώματος και σε διάφορες καταστάσεις (υγρασίας, θερμοκρασίας κλπ.), καθώς επίσης και να γίνουν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις και σε άλλα προγράμματα (PSpice, Simulink κλπ.). Φυσικά, η απόλυτη ταύτιση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, που αφορούν στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, θεωρείται αδύνατη, αφού πρόκειται για ένα κατ' εξοχήν πολυσύνθετο μεταβατικό φαινόμενο. Όμως η βελτίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί τη βάση για ενδεδειγμένη παρουσίαση και βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων και των παραγόντων που καθορίζουν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, η μοντελοποίηση της φάσης του απιονισμού του φαινομένου θα αποτελέσει την αρχή για δημιουργία πιο σύνθετων κυκλωματικών ισοδυνάμων με περισσότερα στοιχεία και κλάδους, που θα προσομοιώνουν με πιο αποτελεσματικό τρόπο τόσο το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους όσο και του απιονισμού.

Βιβλιογραφία

- [1] Φανή Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση Κρίση
- [2] G.F. Tagg, “Earth Resistances”, George Newnes Limited, London, 1964.
- [3] J.H. Scott, “Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soils,” Note 18, Electromagnetic Pulse Theoretical Notes, AFWL EMP 2-1, April, 1971.
- [4] J.W. Erler and D.P. Snowden, “High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4564- 4567.
- [5] R.E. Leadon, T.M. Flanagan, T.M. Mallon, R. Denson, “Effect of Ambient Gas on Arc Initiation Characteristics in Soil,” ,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4572- 4576.
- [6] E.E. Oettle, “The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil,” Transactions on the South African IEE, December 1983, pp.63-70.
- [7] E.E. Oettle, “A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp.2020-2029.
- [8] G.M. Petropoulos, “The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances,” Journal IEE, Vol. 95, Part II, 1948, pp.59-70.
- [9] A.C. Liew, M. Darveniza, “Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths”, Proc. IEE, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, February 1974
- [10] N.M. Nor, A. Ramli, “Electrical Properties of Dry Soil under High Impulse Currents,” Journal of Electrostatics, Vol. 67, 2007, pp. 500-505.
- [11] P.L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, ” transaction of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 60, March 1941, pp. 123-128.

- [12] P.L. Bellaschi, R.E. Armington, A.E Snowden, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, Part II,” *Transaction of American Institute of Electrical Engineer*, Vol. 61, 1942, pp. 349-363.
- [13] M. Loboda, Z. Pochanke, “Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections,” *18th International Conference on Lightning Protection*, 1985, Munich, pp. 191-198.
- [14] Z. Song, M. R. Raghuveer, J. He, “Influence of the nature of impulse current propagation in soils on transient impedance characteristics,” *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 739–742, 2000.
- [15] J. Wang, A.C.Liew, M. Darveniza, “Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents,” *IEEE Transactions on Power5 Delivery*, Vol. 20,no. 3, July 2005, pp.2160-2165.
- [16] K.J. Nixon. “The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil,” *Διδακτορική Διατριβή*, Ιούλιος 2006
- [17] S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis, “Current- Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, no. 1, January 2006, pp. 194-201.
- [18] M. Hayashi, “Observation of streamer in the soil by surge current,” *JIEE*, Vol 87-14, pp 133-141,1967
- [19] O. Mayr, “Beitrage zur Theorie des statschen und des dynamischen Lichtbogens,” *Arch. für Elektrotechnik*, Vol. 37, pp. 588–608, 1943.
- [20] A. M. Cassie, “Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory”, *CIGRE*, Paris, France, Report No. 102, 1939.
- [21] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu, “Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization,” *Journal of Electrostatics*, 60, 2004, pp.193-202.

- [22] Oettle E.E. Geldenhuys H.J, “Results of Impulse Tests on Practical Electrodes at the High- Voltage Laboratory of The National Electrical engineering research Institute,” Transactions of thw South African IEE, December 1988, pp.71-78.
- [23] K. Berger: ““Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stosstroemen,’ Bulletin Association Suisse des Electriciens, ” 1946, 37 , pp. 197.
- [24] I.F. Gonos, F.V. Topalis and I. A. Stathopoulos, “Transient impedance of grounding rods,” Proceedings of the 11th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH ‘99), London, UK, 23rd -27th August 1999, pp.272-275.
- [25] “Quantifying the lightning transient performance of an earth electrode,” IEEE 6th Africon Conference 2002, Vol. 2, 2nd -4th October, pp.665-670.
- [26] E. Garbagnati, A. Geri, G. Sartorio, G.M. Veca, “Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer modeling and comparison with experimental results”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, March 1992, pp. 1442-1445.
- [27] Ι.Φ. Γκόνοϋ, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων γείωσης,” Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2002.
- [28] Λορέντζου Μ.Ι., “Συμβολή στη μοντελοποίηση και ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γειώσεων”, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2001.
- [29] H. M. Towne, “Impulse characteristics of driven grounds,” Gen. Elect.Rev., Vol. 31, No. 11, November 1928, pp. 605–609.
- [30] A.V. Korsuncev, "Application of the method of Similarity for the Calculation of Impulse Characteristics of Concentrated Electrodes", Elektrichestvo, NOS, 1958, pp 31-35.
- [31] F. Popolansky, "Determination of Impulse Characteristics of Concentrated Earth Electrodes", IGRE SC33-86 (WG 01) IWD 22, Munich, August 1986.

- [32] E.E. Oettle, "Results of impulse tests done on practical electrodes at the National Electrical Engineering Research Institute's Outdoor High Voltage Laboratory," NEERI Internal report, Library No. I ELEK 267, November 1986.
- [33] R. Kosztaluk, M. Loboda, and D. Mukhedkar, "Experimental study of Transient Ground Impedances," IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-100; No. 11, November 1981, pp. 4653-4660.
- [34] R. Velazquez and D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behaviour," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, No. 6, July 1984, pp. 1314-1322.
- [35] E.J. Riabkova, V.M. Mishkin, "Impulse Characteristics of Earthings for transmission Line Towers" ELEKTRICHESTVO' No. 8, 1976, pp. 67-70.
- [36] A. Geri, M.G. Veca, E. Garbagnati, and G. Sartorio, "Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer modeling and comparison with experimental results," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, Marz. 1992, pp. 1442-1445.
- [37] A. Geri, "Behavior of grounding systems excited by high Impulse Currents: the model and its validation," IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.3, July 1999, pp.1008-1017.
- [38] J. Cidras, A.F. Otero and C. Garrido, "Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization effect," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp.103-107.
- [39] N. M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils under Fast Impulses," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 353-361.
- [40] N.M. Nor, "Simulation of Earthing systems under High Impulse Conditions," IEEE Transactions on Power Delivery, January 2006, pp. 347-352.

- [41] Αντιγόνη Λοΐζου, “Ηλεκτρική διάσπαση δειγμάτων χώματος”, Διπλωματική Εργασία.
- [42] Differential Probe, MD 200 User Manual, Version 1.01 Apr2003.
- [43] Digital Phosphor Oscilloscopes, Tektronix TDS3000 Series, User Manual.
- [44] V.M. Cabrera, M.S. Lundquist, and V. Cooray, “On the physical properties of discharges in sand under lightning impulses,” J. Electrostat., vol. 30, no. 40, pp. 17-28, May 1993.
- [45] Juan A. Martinez – Velasco, “Power System Transients Parameter Determination”.
- [46] V.A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, M.I. Fernandez, R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J.P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P. Laroche, and A. Bondiou-Clergerie, “New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama,” J. Geophys. Res., vol. 103, no. D12, pp.14.117-14.130, 1998.

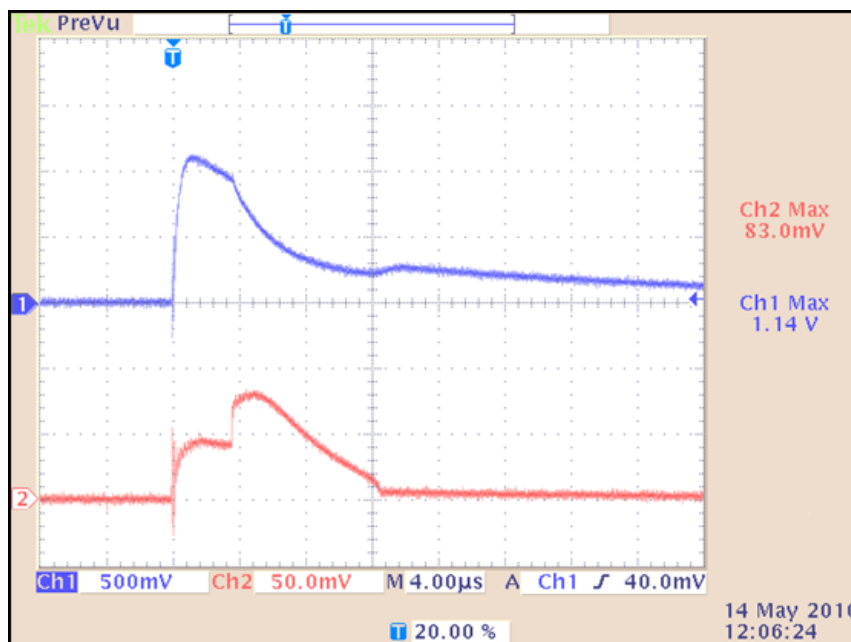
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

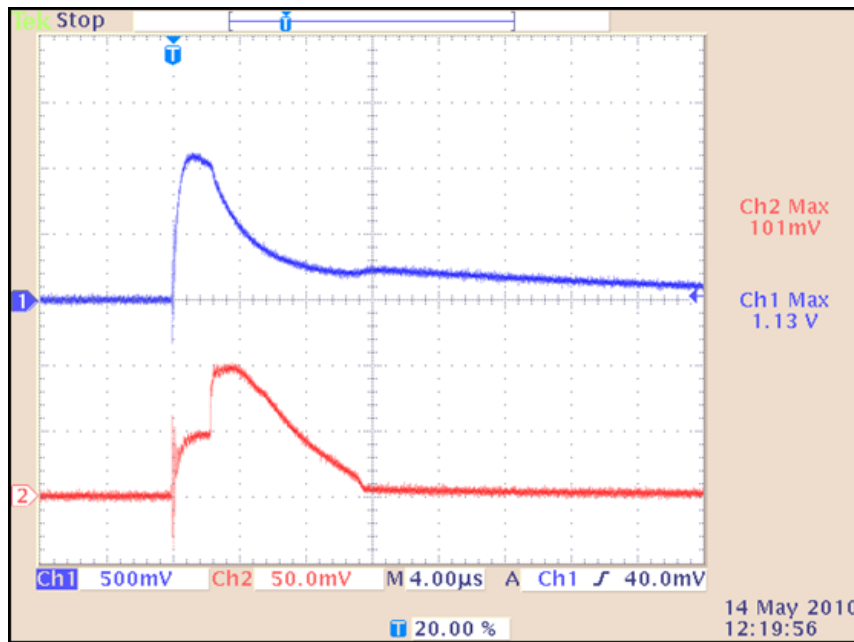
Α.1 Παρουσίαση παλμογραφημάτων

Παρακάτω παρατίθενται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Χρησιμοποιήθηκε χόμα με 5% περιεκτικότητα σε υγρασία, στο οποίο επιβλήθηκε κρουστική τάση θετικής πολικότητας. Δίπλα σε κάθε παλμογράφημα καταγράφονται η τάση πρωτεύοντος σε V, η θερμοκρασία σε °C, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος (%), καθώς επίσης και η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar.

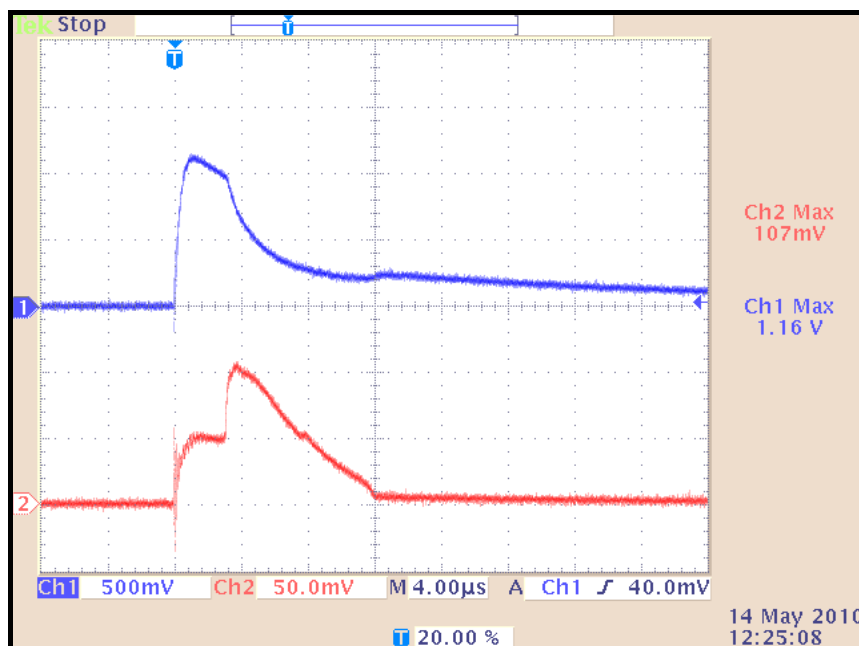
Α.1.1 Παλμογραφήματα για δείγμα χόματος Α, υγρασία 5% και θετική πολικότητα



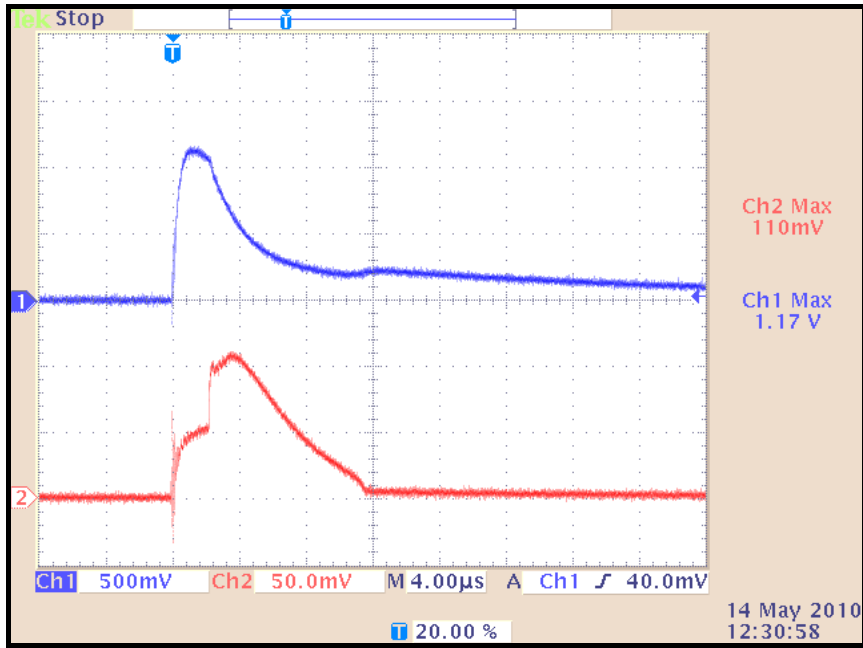
Τάση Ιοντος = 55 V
Θερμοκρασία: 26,4° C
Πίεση: 987 mbar
Υγρασία: 31,5%



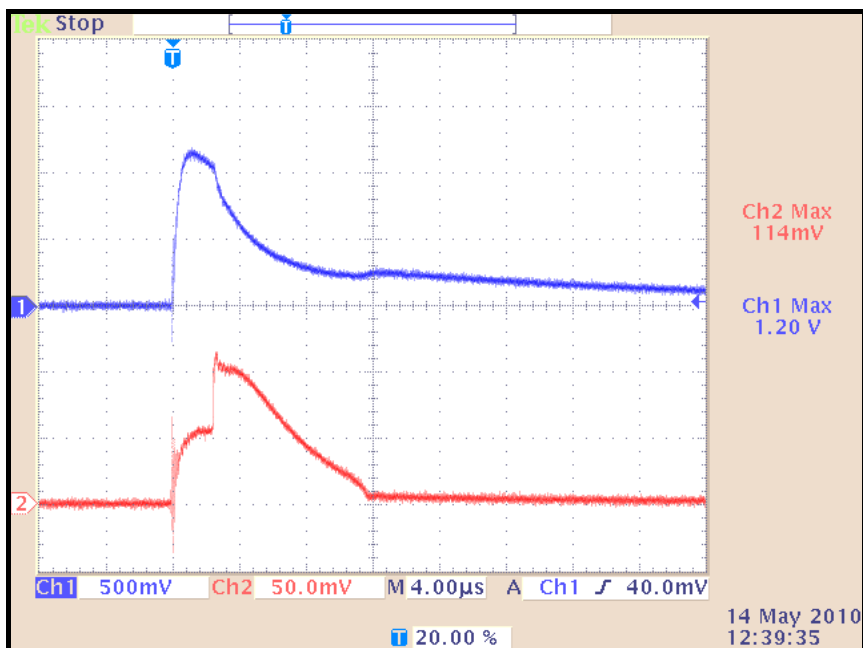
Τάση Ιοντος = 55,7 V
 Θερμοκρασία: 26,4° C
 Πίεση: 987 mbar
 Υγρασία: 31,5%



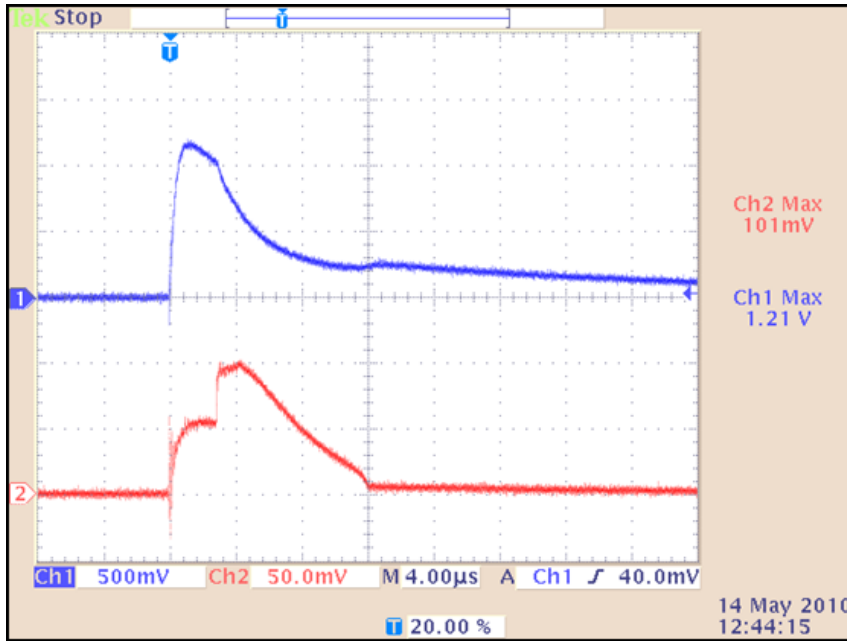
Τάση Ιοντος = 57,2 V
 Θερμοκρασία: 26,4° C
 Πίεση: 987 mbar
 Υγρασία: 31,5%



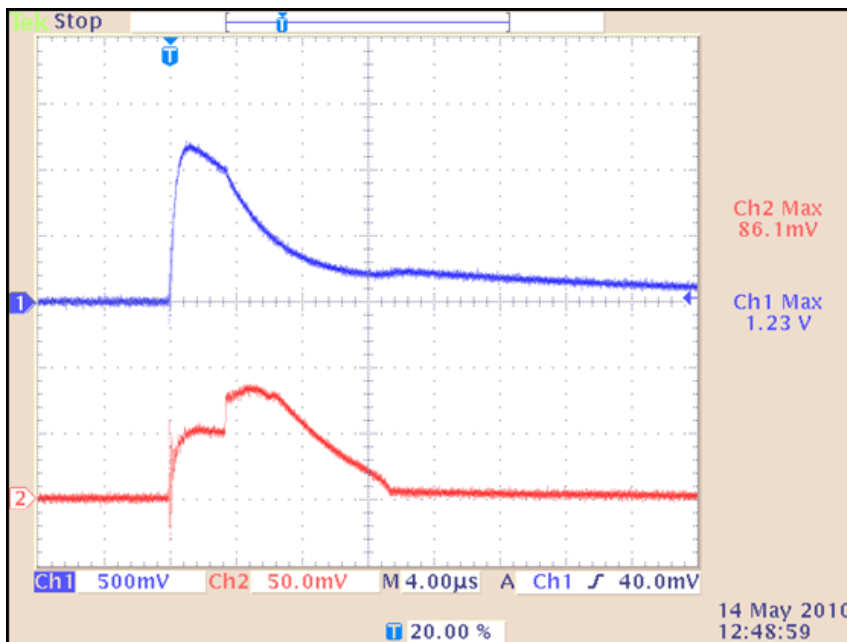
Τάση Ιοντος = 58 V
 Θερμοκρασία: 26,4° C
 Πίεση: 987 mbar
 Υγρασία: 31,5%



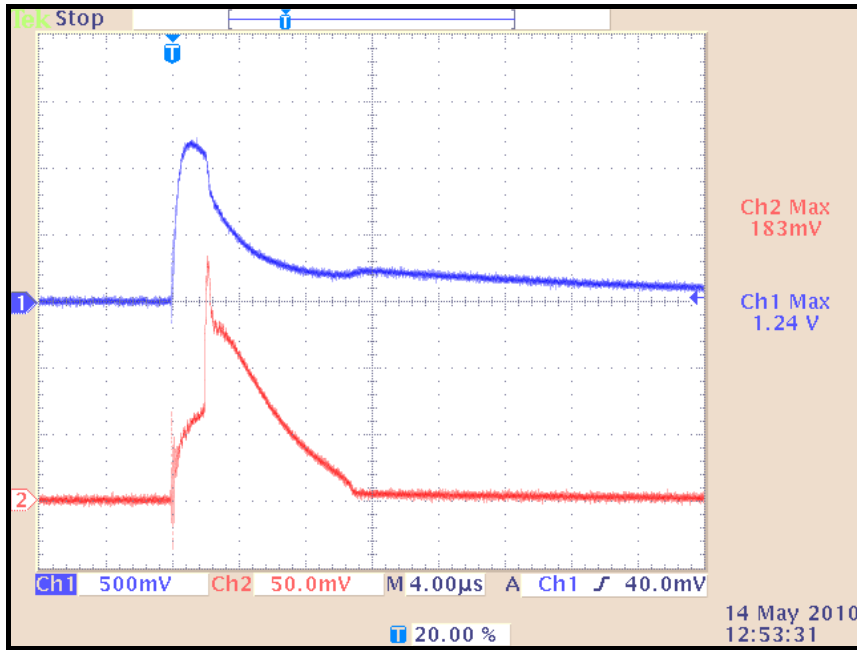
Τάση Ιοντος = 58,7 V
 Θερμοκρασία: 26,4° C
 Πίεση: 987 mbar
 Υγρασία: 31,5%



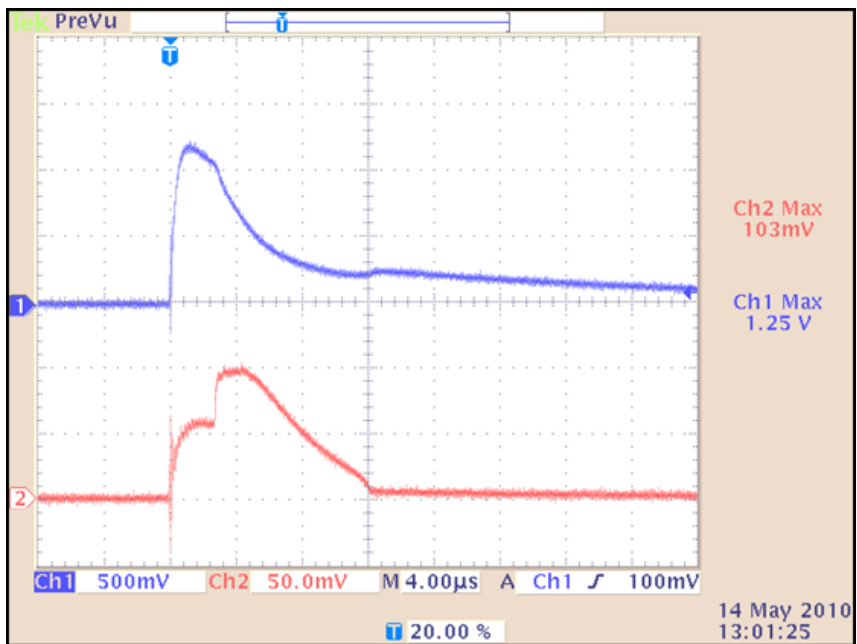
Τάση Ιοντος = 59,5 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



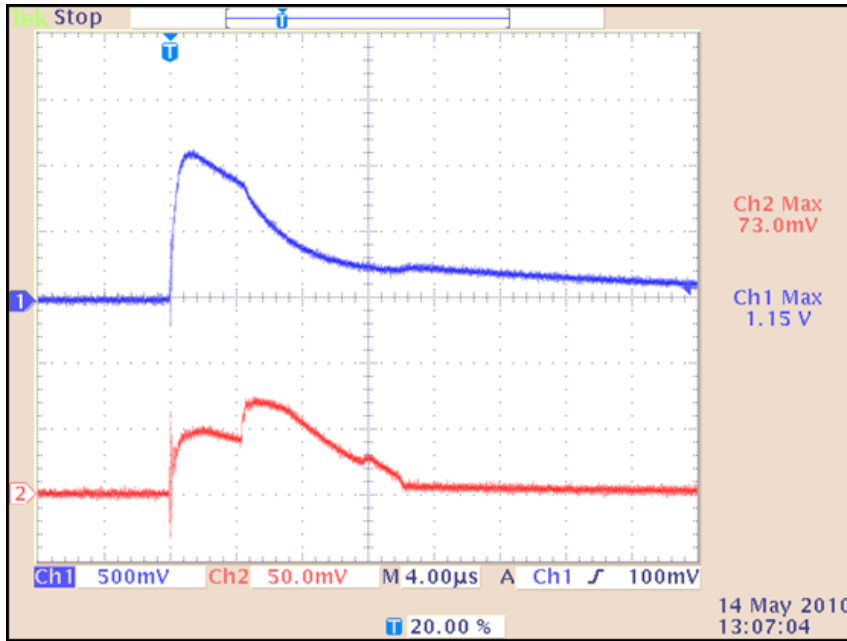
Τάση Ιοντος = 60 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



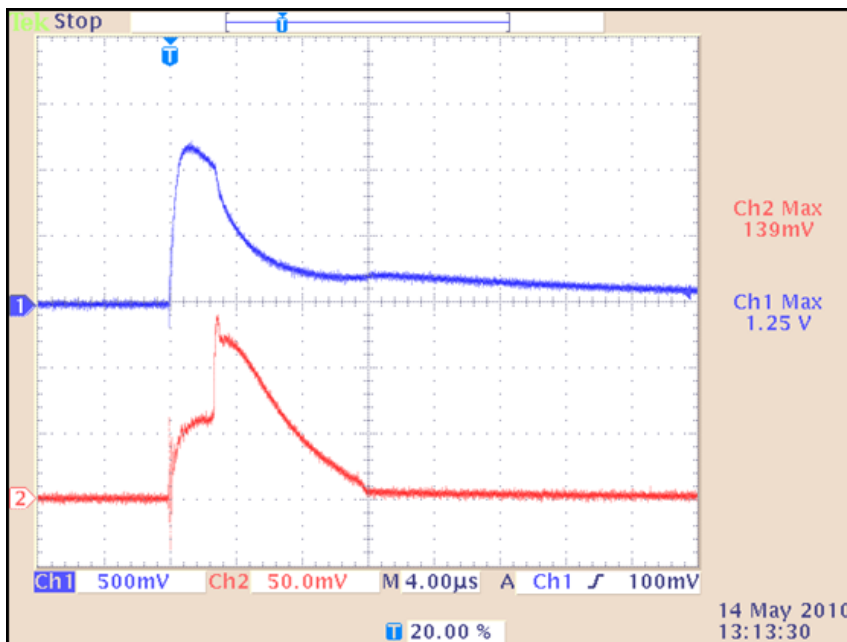
Τάση Ιοντος = 61,3 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



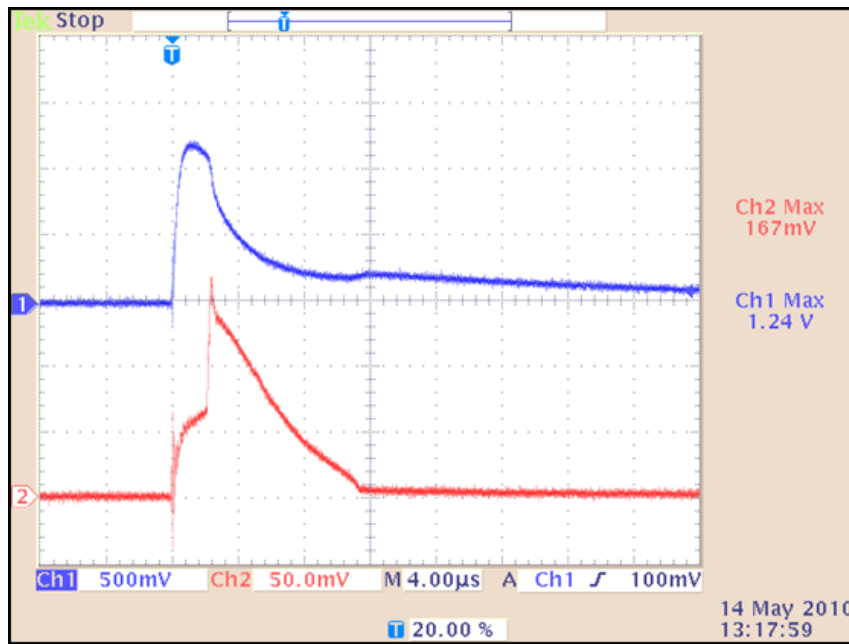
Τάση Ιοντος = 60,6 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



Τάση Ιοντος = 56,5 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



Τάση Ιοντος = 61 V
 Θερμοκρασία: 26,6° C
 Πίεση: 988 mbar
 Υγρασία: 31,1%



Τάση Ιοντος = 61,7 V
Θερμοκρασία: 26,7° C
Πίεση: 987 mbar
Υγρασία: 30,2%

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ PSCAD/EMTDC

B.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολυσύνθετο με πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις να το καθορίζουν. Τα συστήματα ισχύος είναι τα μεγαλύτερα συστήματα στα οποία έχουν εφαρμογή άλλα περίπλοκα μηχανήματα όπως οι υπολογιστές. Το EMTDC είναι ένας προσομοιωτής ηλεκτρικών δικτύων με δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων ηλεκτρονικών ισχύος, ελέγχων και μη-γραμμικών δικτύων. Όταν λειτουργεί στο PSCAD γραφικό περιβάλλον (graphical user interface), γίνεται ένα ισχυρό εργαλείο για την απεικόνιση μεγάλων σε μέγεθος και πολυπλοκότητα κομματιών συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος. [1]

Το EMTDC είναι ένας προσομοιωτής μεταβατικής κατάστασης που εξελίσσεται από τα μέσα της δεκαετίας του 70. Αρχικά εμπνεύστηκε από το κλασσικό άρθρο Απρίλιος 1969 IEEE του Dr. Hermann Dommel που δημοσιεύτηκε στο Transactions of Power Apparatus and Systems. [2]

Η αρχική έκδοση του EMTDC έτρεχε στο Manitoba Hydro σε κεντρικούς υπολογιστές που χρησιμοποιούσαν διατρητικές κάρτες IBM. Μόνο μια ή δυο εφαρμογές μπορούσαν να διεκπεραιωθούν σε μια μέρα και οι ταχύτητες ήταν πολύ μικρές αν συγκριθούν με τα σημερινά δεδομένα. Σήμερα, οι προσωπικοί υπολογιστές επιτρέπουν λεπτομερή και σε βάθος προσομοίωση σε βαθμό που δε θα μπορούσε κανείς ούτε να φανταστεί πριν από 30 χρόνια.

Οι χρήστες απαιτούν αποτελεσματικότητα και απλότητα στο EMTDC και σε αυτό συγκεντρώθηκε το Manitoba HVDC ερευνητικό κέντρο. Το PSCAD/EMTDC δημιουργήθηκε στις αρχές του 1990 σε περιβάλλον Unix. Είχε αμέσως επιτυχία στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος και στον έλεγχο ηλεκτρονικών ισχύος.

Με την εμφάνιση των λειτουργικών συστημάτων Windows για προσωπικούς υπολογιστές και των διευρυνμένων ικανοτήτων τους, το Manitoba HVDC ερευνητικό κέντρο άρχισε να αναπτύσσει μια καινούρια έκδοση του PSCAD. [1]

B.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ PSCAD/EMTDC ;

Το PSCAD/EMTDC είναι ένα επαγγελματικό εργαλείο προσομοίωσης για την ανάλυση συστημάτων ισχύος. Το PSCAD είναι το γραφικό περιβάλλον και το EMTDC είναι η μηχανή προσομοίωσης. Το PSCAD/EMTDC είναι πιο κατάλληλο για κρουστικές αποκρίσεις στο πεδίο του χρόνου που είναι γνωστό και ως ηλεκτρομαγνητική μεταβατική κατάσταση των ηλεκτρικών συστημάτων.

Το PSCAD γραφικό περιβάλλον βελτιώνει κατά πολύ την ισχύ του EMTDC. Επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει σχηματικά ένα κύκλωμα, να τρέξει την προσομοίωση, να αναλύσει τα αποτελέσματα και να διαχειρίζεται τα δεδομένα σε ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό περιβάλλον.

Η έκδοση του PSCAD V.4.2.1 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αντιπροσωπεύει τις τελευταίες εξελίξεις στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος. Η συγκεκριμένη έκδοση διατηρεί τα ισχυρά μοντέλα προσομοίωσης των προηγούμενων εκδόσεων, ενώ ταυτόχρονα φέρνει μια ανανεωμένη και φρέσκια ματιά και αίσθηση στη σχεδίαση με αύξηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας της προσομοίωσης. [1]

B.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ [3]

Τα ηλεκτρικά συστήματα και τα συστήματα ελέγχου πλέον δεν καθορίζονται ολοσχερώς από την εισαγωγή πληροφοριών ενώ το πρόγραμμα είναι κρυμμένο κάπου στο βάθος της μνήμης του υπολογιστή όπου ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση. Βασικά κυκλώματα και στοιχεία υπάρχουν είδη σε υπορουτίνες για εύκολη συναρμολόγηση από το χρήστη. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να φτιάξει δικές του υπορουτίνες, αν τα επιθυμητά μοντέλα δεν είναι διαθέσιμα ή αποδεκτά.

Με στόχο τον ευέλικτο προγραμματισμό, το EMTDC έχει στη δομή του ένα κυρίως πρόγραμμα που συντονίζει όλες τις δραστηριότητες εισόδου και εξόδου, λύσεις δικτύων και interfacing στο μοντέλο του χρήστη. Το κυρίως πρόγραμμα του EMTDC καλεί τις παρακάτω υπορουτίνες:

- DSDYN – User defined dynamics
- DSOUT – User defined output

Αυτές οι δυο υπορουτίνες είναι ολοκληρωτικά ευθύνη του χρήστη.

Άλλες υπορουτίνες και βιβλιοθήκες διατίθενται σε μεταγλωττισμένη μορφή.

Μερικές από τις πιο σημαντικές λειτουργίες του κυρίως προγράμματος είναι οι εξής :

- Το διάβασμα των πληροφοριών που καθορίζουν τις παραμέτρους του ηλεκτρικού κυκλώματος.
- Η δικτυακή συναρμολόγηση των αντιστάσεων, επαγωγών και χωρητικοτήτων μαζί με Thevenin και Norton πηγές, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς και καλώδια.
- Η σύνδεση ενός μοντέλου του χρήστη με το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Στον προσδιορισμό του χρήστη, τα αποτελέσματα κάθε υπολογισμένης ποσότητας εξόδου παρουσιάζονται σε σειρά σε κάθε βήμα, και τυπώνονται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η υπορουτίνα DSOUT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το λόγο.
- Κατά τη διάρκεια ή μετά το τρέξιμο, το ηλεκτρικό σύστημα και/ή το συνοδευτικό δυναμικό μοντέλο καθορισμένο στο DSDYN μπορεί να παγώσει για μελλοντική χρήση σε ένα SNAPSHOT αρχείο.
- Πολλαπλά τρεξίματα μπορούν επίσης ταυτόχρονα να λάβουν μέρος προς αναζήτηση της βέλτιστης τιμής μιας παραμέτρου.

B.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ

Τα παρακάτω είναι μερικά από τα πιο κοινά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα μέσω του PSCAD/EMTDC:

- Αντιστάσεις (R), επαγωγές (L), πυκνωτές (C)
- Μετασχηματιστές

- Γραμμές και καλώδια μεταφοράς εξαρτημένα από τη συχνότητα
- Πηγές τάσης και ρεύματος
- Διακόπτες
- Δίοδοι, θυρίστορ και GTO
- Αναλογικές και ψηφιακές λειτουργίες ελέγχου
- AC μηχανές, διεγέρτες, σταθεροποιητές και αδρανή μοντέλα
- Μετρητές
- Ελεγκτές AC και DC κατηγορίας
- HVDC, SVC και άλλα.

Στην τρέχουσα έκδοση του PSCAD/EMTDC (V.4.2.1) έχει προβλεφθεί να επιτρέπονται μηδενικές αντιστάσεις (και άπειρες πηγές τάσης σε διακόπτες). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται επιτρέπει κάθε συνδυασμό ιδανικών κλάδων (συμπεριλαμβανομένων και των επαναληπτικών) εκτός από την περίπτωση που υπάρχουν δυο ή περισσότεροι ιδανικοί κλάδοι, ο ένας από τους οποίους είναι πηγή τάσης (ο οποίος θα δημιουργήσει ένα άπειρο ρεύμα στον άλλο παράλληλο κλάδο). Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος των ιδανικών κλάδων είναι πολύ αξιόπιστος και δίνει τα θεωρητικά αποτελέσματα, εμπεριέχει πολύπλοκους υπολογισμούς για να λύσει το πρόβλημα της διαίρεσης με το μηδέν. Η καλύτερη λύση είναι η τοποθέτηση μιας λογικής τιμής αντίστασης, τυπική για ένα κλειστό διακόπτη, η οποία βελτιώνει και την ταχύτητα προσομοίωσης.

Ένα ακόμα σημαντικό γεγονός είναι η σωστή επιλογή λογικού διαστήματος ή χρονικού βήματος. Με ακατάλληλο χρονικό βήμα τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου θα χαθούν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν θα έχουν νόημα. Ένας καλός εμπειρικός κανόνας είναι να χρησιμοποιήσουμε χρονικό βήμα τουλάχιστον 100 φορές μικρότερο από την περίοδο ταλάντευσης. Συνεπώς, η επιλογή του χρονικού βήματος δεν πρέπει να είναι αυθαίρετη αλλά συνετή επιλογή. Για τους παραπάνω λόγους, το χρονικό βήμα παραμένει σταθερό μετά τον υπολογισμό του σε κάθε αρχείο. Το Δt στο πρόγραμμα ονομάζεται DELT. [2]

Το πρόγραμμα αυτό είναι εύχρηστο και δίνει πολλές δυνατότητες στον χρήστη. Υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης ολόκληρης σελίδας ή προεπιλεγμένων αντικειμένων. Μπορούμε να έχουμε οποιοδήποτε παλμογραφήματα και γραφικές παραστάσεις. Υπάρχει η δυνατότητα να συνδέσουμε μέσω καλωδίων και T-γραμμών μεταφοράς δυο κυκλώματα που βρίσκονται σε διαφορετικές σελίδες. Επίσης μπορούμε να μεταφέρουμε μεταβλητές από σελίδα σε σελίδα. Μπορούμε να δημιουργήσουμε υποσελίδες, αν το κύκλωμά μας είναι πολύ μεγάλο. Μπορούμε να δημιουργήσουμε ελέγχους και πλήκτρα χειρισμού on/off και άλλα. Ο χρόνος και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης αλλάζουν. Παρά το γεγονός ότι το πρόγραμμα αυτό έχει μια πλούσια βιβλιοθήκη, μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε καινούρια στοιχεία (components) με υπορουτίνες σε Fortran. Η διαδικασία εύρεσης κάποιου αντικειμένου σε ένα αρχείο ή βιβλιοθήκη είναι δυνατή μετά την ενεργοποίηση του αρχείου ή της βιβλιοθήκης με το πλήκτρο που έχει σήμα τα κιάλια. [3]

B.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα παρακάτω είναι παραδείγματα συνηθισμένων μελετών προσομοίωσης [1] που έχουν γίνει με τη χρήση του EMTDC:

- Στατιστικές μελέτες AC δικτύων που αποτελούνται από κινητήρες, διεγέρτες, κυβερνήτες, στροβίλους, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, καλώδια και φορτιστές
- Συντονισμός ηλεκτρονόμων
- Επιδράσεις κορεσμού μετασχηματιστών
- Μόνωση μετασχηματιστών και διακοπών
- Κρουστικές δοκιμές μετασχηματιστών
- Μελέτη υπο-σύγχρονης απόκρισης (SSR) δικτύων με μηχανές, γραμμές μεταφοράς και HVDC συστήματα
- Σχεδίαση φίλτρων και ανάλυση αρμονικών

- Σχεδίαση συστημάτων ελέγχου και συντονισμός FACTS και HVDS; περιλαμβάνοντας STATCOM, VSC και κυκλομετατροπείς
- Βέλτιστη σχεδίαση παραμέτρων ελέγχου
- Έρευνα για νέα κυκλώματα και ελεγκτές
- Μελέτες καθορισμού χειρότερης περίπτωσης υπέρτασης από κεραυνό και σφάλματα διακοπής
- Διερεύνηση των παλμικών επιδράσεων των μηχανών diesel και των ανεμοστρόβιλων σε ηλεκτρικά δίκτυα

B.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

[Π1] PSCAD, The professional's toolset for Power System Simulation, Version 4.2.1, Online Help

[Π2] H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks", IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, April 1969

[Π3] PSCAD/EMTDC USER'S GUIDE