

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

Προσομοίωση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Γ. Κουρέλης

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Επιβλέπουσα: Φανή Η. Ασημακοπούλου Υποψηφία Διδάκτωρ

Αθήνα, Ιανουάριος 2010



Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σ χολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

154

Προσομοίωση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Γ. Κουρέλης

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Φανή Η. Ασημακοπούλου Υποψήφια Διδάκτωρ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Ιανουαρίου 2010

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής Καθηγητής

Αθήνα, Ιανουάριος 2010

•••••

Χρήστος Γ. Κουρέλης

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

Copyright © Χρήστος Γ. Κουρέλης, 2010 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

" Δώσε στον άνθρωπο ένα ψάρι και θα τον χορτάσεις μια φορά. Μάθε τον να πιάνει ψάρια και θα είναι χορτασμένος σε όλη του τη ζωή. " Μαϊμωνίδης, 1135-1204, Φιλόσοφος

"Για να φθάσει κάποιος στην Αλήθεια, είναι απαραίτητο, έστω μια φορά στη ζωή του, να αμφιβάλει για τα πάντα, όσο το δυνατόν περισσότερο." Καρτέσιος, 1596-1650, Γάλλος φιλόσοφος

"Η εκπαίδευση είναι θαυμάσιο πράγμα. Αλλά καλό είναι να θυμόμαστε ότι τίποτε από όσα αζίζει να γνωρίζουμε δεν μπορεί να διδαχθεί." Oscar Wilde, 1854-1900, Ιρλανδός συγγραφέας

"Ο ιδανικός χρόνος για να αρχίσει η διαμόρφωση του χαρακτήρα ενός παιδιού είναι εκατό χρόνια πριν τη γέννησή του." William Ralph Inge, 1860-1954, Άγγλος συγγραφέας & εκπαιδευτικός

" Όταν εκπαιδεύεις ένα αγόρι, μορφώνεις ένα αγόρι. Όταν εκπαιδεύεις ένα κορίτσι, μορφώνεις μια ολόκληρη γενιά." Ινδική παροιμία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμ	ενα	i
Περίληψι	۱	iv
Πρόλογος		vi
КЕФАЛА	MO 1. Γειώσεις	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Είδη Γειώσεων	2
1.3	Μέθοδοι Γειώσεων	3
	1.3.1 Άμεση γείωση	4
	1.3.2 Ουδετέρωση	4
	1.3.3 Γείωση με αποζεύκτη διαφυγής τάσης	4
	1.3.4 Γείωση με αποζεύκτη διαφυγής έντασης	4
1.4	Αντίσταση Γείωσης	4
	1.4.1 Ειδική αντίσταση εδάφους	5
1.5	Τύποι και Μορφές Γειωτών	6
	1.5.1 Γειωτής ράβδου	7
	1.5.1.1 Γειωτής ράβδου κυκλικής διατομής	7
	1.5.1.2 Γειωτής ράβδου διατομής σταυρού	8
	1.5.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου	8
	1.5.3 Γειωτής πλάκας	8
	1.5.4 Γειωτής ακτινικός	9
	1.5.5 Γειωτής πλέγματος	9
	1.5.6 Γειωτής τύπου "E"	9
	1.5.7 Αντιστάσεις γειωτών	10
	1.5.8 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές	12
	1.5.9 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης	12
	1.5.10 Ενδεικτική χρήση γειωτών	12
1.6	Συστήματα Γείωσης	12
	1.6.1 Πολυγωνική διάταξη γείωσης	13
	 1.6.2 Γείωση με πλάκες 	13
	 1.6.3 Περιμετρική γείωση 	13

	1.6.4 Θεμελιακή γείωση	13		
	1.6.5 Γείωση με γειωτή τύπου "Ε"			
	1.6.6 Συνδυασμός γειώσεων			
1.7	Βελτιωτικά Υλικά Γειώσεων			
1.8	Βασικές Έννοιες	16		
КЕФАЛА	ΔΙΟ 2. Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης	19		
2.1	Γενικά	19		
2.2	Κρουστική Σύνθετη Αντίσταση	20		
2.3	Μέθοδοι και Μοντέλα Προσομοίωσης			
	2.3.1 Αναλυτικές και εμπειρικές μέθοδοι	23		
	2.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι	24		
	2.3.2.1 Κυκλωματική προσέγγιση	25		
	2.3.2.2 Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	28		
	2.3.2.3 Υβριδική προσέγγιση	31		
	2.3.2.4 Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς	31		
	2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	33		
	2.3.2.6 Βελτιωμένες προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς -	34		
	2.3.2.6.1 Μειονεκτήματα της προσέγγισης			
	ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς	34		
	2.3.2.6.2 Προσέγγιση μη ομοιόμορφης			
	γραμμής μεταφοράς	36		
КЕФАЛА	ΔΙΟ 3. Εισαγωγή στο PC OPERA-2D	46		
3.1	Γενικά	46		
3.2	Φιλοσοφία του Προγράμματος	46		
	3.2.1 Γραμμή εργαλείων	47		
	3.2.2 Μοντελοποίηση	52		
	3.2.3 Προ-επεξεργασία (Pre-processing)	53		
	3.2.4 Ανάλυση (Analysis)	56		
	3.2.5 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)	56		
3.3	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	57		
3.4	Προγράμματα Ανάλυσης	61		
3.5	Μεταβατική Ανάλυση (Transient Analysis)	62		

	3.5.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται	63
	3.5.2 Συναρτήσεις εισόδου	63
	3.5.3 Δινορρεύματα και αγωγοί εισόδου	67
	3.5.4 Εξωτερικά κυκλώματα	68
	3.5.5 Χρονικός βηματισμός (Time-stepping)	68
	3.5.5.1 Προσαρμοστικός χρονικός βηματισμός	
	(Adaptive time-stepping)	69
	3.5.5.2 Σταθερό χρονικό βήμα (Fixed time step)	69
	3.5.6 Επανεκκινήσεις	70
	3.5.7 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2D/TR	70
	3.5.8 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2D/TR	73
КЕФА/	ΑΑΙΟ 4. Προσομοιώσεις Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστ	ημάτων
	Γείωσης με το PC OPERA-2D	74
4.1	Κατακόρυφο Ηλεκτρόδιο Τοποθετημένο σε Έδαφος	
	Αποτελούμενο από Ημισφαιρικά Κελύφη	74
	4.1.1 Γεωμετρία του προβλήματος	74
	4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	76
	4.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	84
4.2	2 Κατακόρυφο Ηλεκτρόδιο Τοποθετημένο σε Έδαφος	
	με Οριζόντια Διαστρωμάτωση	86
	4.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος	86
	4.2.1.1 Ηλεκτρόδιο μήκους 2m	86
	4.2.1.2 Ηλεκτρόδιο μήκους 5m	88
	4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	88
	4.2.2.1 Ηλεκτρόδιο μήκους 2m	88
	4.2.2.2 Ηλεκτρόδιο μήκους 5m	97
	4.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	100
КЕФА/	ΑΑΙΟ 5. Συμπεράσματα - Η Επόμενη Μέρα	102
Βιβλιογ	ραφία	104

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και προσομοίωση με τη βοήθεια του δισδιάστατου προγραμματιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-2D Version 13.0 της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης.

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την παρουσίαση της σχετικής με τα συστήματα γείωσης και τα μοντέλα προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς αυτών βιβλιογραφίας, την αναλυτική περιγραφή του PC OPERA-2D δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο χειρισμού και λειτουργίας του προγράμματος μεταβατικής ανάλυσης, την περιγραφή των διεξαχθέντων προσομοιώσεων, την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτές.

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα Γείωσης, Μεταβατική Συμπεριφορά, Υψηλή Τάση, Προσομοίωση, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the discussion and simulation with the help of the two-dimensional electric field analysis program, PC OPERA-2D Version 13.0, of the transient behavior of grounding systems.

This diploma thesis includes the presentation of the bibliography related to the grounding systems and their transient behavior simulation models, the analytical description of PC OPERA-2D and its transient analysis program handling and operation, the description of the carried out simulations, the analysis and annotation of the simulation results.

Key Words

Grounding System, Transient Behavior, High Voltage, Simulation, Finite Element Method

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Χρήστου Κουρέλη για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Για το σκοπό αυτό, διάφορα συστήματα γείωσης προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-2D Version 13.0.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στις γειώσεις. Αναφέρεται τι είναι γείωση, ο σκοπός ύπαρξής της, τα διάφορα είδη και οι μέθοδοι γείωσης. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στους γειωτές και τα είδη αυτών, καθώς και στα διάφορα συστήματα γείωσης. Επίσης, ορίζεται η αντίσταση γείωσης, η σημασία της και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Ακολουθεί επεξήγηση βασικών εννοιών, που χρησιμοποιούνται παρακάτω στην εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μετά από σύντομη επεξήγηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, ακολουθεί μία ιστορική ανασκόπηση των κυριοτέρων μεθόδων και μοντέλων προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, τα οποία έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία και περιγράφοντας εκτενώς την προσέγγιση της μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς, που αποτελεί το πιο σύγχρονο μοντέλο προσομοίωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται οι οδηγίες για τη λειτουργία του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-2D Version 13.0, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων συστημάτων γείωσης στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στο πρόγραμμα και εξηγείται η φιλοσοφία του. Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, αφού αναφέρονται τα προγράμματα ανάλυσης, που χρησιμοποιεί το Opera-2D, γίνεται εκτενής περιγραφή της λειτουργίας του επιλύτη της μεταβατικής ανάλυσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται στατική και μεταβατική επίλυση προβλημάτων συστημάτων γείωσης πολυστρωματικών εδαφών με το Opera-2D. Αρχικά, προσομοιώνεται η περίπτωση εδάφους με διαστρωμάτωση ημισφαιρικών κελύφων και, στη συνέχεια, η περίπτωση εδάφους οριζόντιας διαστρωμάτωσης. Μετά την

vi

παρουσίαση των αποτελεσμάτων, γίνεται σχολιασμός αυτών, από τον οποίο προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τους κατασκευαστές συστημάτων γείωσης. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διπλωματική εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση και επέκταση του αντικειμένου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για το άριστο κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Κυρία Φανή Η. Ασημακοπούλου, Υποψηφία Διδάκτορα και Διπλωματούχο Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε πρόθυμα και αδιάκοπα, αλλά και για την ηθική στήριξή της καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Την ευχαριστώ, επίσης, θερμά για το υλικό που μου παρείχε, το οποίο με βοήθησε σημαντικά στη συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης προς τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και για τις εύστοχες επισημάνσεις του σε καίρια σημεία της εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Κυρία Βασιλική Κονταργύρη, Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις πολύτιμες συμβουλές της σχετικά με το χειρισμό του προγράμματος PC OPERA.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Alex Michaelides, υπεύθυνο υποστήριξης και εφαρμογών της Vector Fields, για την καθοριστική, ακόμη και από απόσταση, συμβολή του στην επιτυχή αντιμετώπιση ορισμένων σημαντικών δυσκολιών που συνάντησα σε κρίσιμα σημεία της προσπάθειάς μου.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω όλα τα Μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη που μου παρείχαν και το φιλικό κλίμα με το οποίο με περιέβαλλαν όλο αυτό το διάστημα.

Τελευταίους στη σειρά, αλλά, βέβαια, όχι σε σπουδαιότητα, ευχαριστώ ολόψυχα τους γονείς μου, που καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, με στήριξαν ηθικά και υλικά, όντες δίπλα μου στην όλη προσπάθειά μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΙΩΣΕΙΣ

1.1 Γενικά

Ο όρος γείωση περιγράφει την αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των μη ρευματοφόρων μεταλλικών μερών μιας εγκαταστάσεως ή του ουδέτερου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών, προκειμένου να αποκτήσουν το ίδιο δυναμικό με τη γη, κατά σύμβαση μηδέν.

Σκοπός της γείωσης είναι να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του, σε περίπτωση εμφανίσεως οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από ηλεκτροπληξία άτομα που είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις αναπτυσσόμενες διαφορές δυναμικού (βηματική τάση και τάση επαφής) που δημιουργούνται, κάτω από συγκεκριμένα όρια [1, 2].

Σύστημα γείωσης είναι ένα σύνολο ομοειδών ή μη γειωτών, συνδεδεμένων με αγωγό (αγωγό γείωσης) και το σύνολο των εξαρτημάτων που απαιτούνται για τη σύνδεση και στήριξη αυτών.

Το σύστημα γείωσης αποτελεί ένα αναπόσπαστο και καίριας σημασίας τμήμα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας οποιουδήποτε τμήματος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. υποσταθμοί, σταθμοί παραγωγής, γραμμές μεταφοράς κτηρίων τηλεπικοινωνιακών πύργων, κ.τ.λ.). Επιπλέον, ένα σωστά κατασκευασμένο σύστημα γείωσης προστατεύει το προσωπικό, που είναι πιθανό να βρίσκεται στο υπό προστασία κτήριο, και αποτρέπει καταστροφές τόσο στο άψυχο όσο και στο έμψυχο υλικό.

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του συστήματος γείωσης θα πρέπει να είναι γνωστή η δομή του εδάφους στην περιοχή, όπου θα τοποθετηθεί. Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν δείξει ότι το έδαφος μπορεί ν' αποτελείται από διαφορετικά στρώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (τιμή ειδικής αντίστασης,

πάχος στρώματος κ.τ.λ.). Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί τόσο διστρωματικά όσο και πολυστρωματικά μοντέλα για τη δομή του εδάφους. Ανάλογα με το μοντέλο διαφοροποιείται και η υπολογιζόμενη τιμή του αναπτυσσόμενου στην επιφάνεια του εδάφους δυναμικού.

1.2 Είδη Γειώσεων

Οι γειώσεις διακρίνονται ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους. Τα κύρια είδη, αν και στην πράξη πολλές φορές συνυπάρχουν σε ένα σύστημα, είναι τα εξής [3 - 5]:

Γειώσεις Λειτουργίας

Γείωση λειτουργίας ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους (π.χ. εγκαταστάσεις τραμ) ή για την αποφυγή υπερτάσεων (π.χ. γείωση ουδετέρου κόμβου μετασχηματιστών ή γεννητριών). Αυτή διακρίνεται σε:

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

Η γείωση χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, όταν στη γραμμή γειώσεως έχουν παρεμβληθεί διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως. Οι ανοικτές γειώσεις δεν θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας [6].

Γειώσεις Προστασίας και Ισοδυναμικών Συνδέσεων

Γείωση προστασίας είναι η αγώγιμη σύνδεση με τη γη των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπτών, των μολύβδινων μανδυών και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.). Τέτοιου είδους γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων από εμφάνιση επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση (Σχήμα 1.1). Η γείωση προστασίας μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να χρησιμεύσει και για την απαγωγή στατικού φορτίου.

Γειώσεις Ασφαλείας ή Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κεραυνοί (Σχήμα 1.1). Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικεραύνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.



Σχήμα 1.1: Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [7]

Όταν δεν πρόκειται για οικιακή εγκατάσταση, τότε οι γειώσεις προστασίας και ασφάλειας συνυπάρχουν σε μία διάταξη η οποία είναι μέρος της συνολικής διάταξης αντικεραυνικής προστασίας [4].

Άλλα είδη γειώσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι «Γειώσεις Υποσταθμών Μέσης Τάσης» και τα τελευταία χρόνια οι «Γειώσεις Συστημάτων Επεξεργασίας Πληροφοριών (ΣΕΠ)» [5].

1.3 Μέθοδοι Γειώσεων

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι εξής [3]:

<u>1.3.1 Άμεση γείωση</u>

Απ' ευθείας αγώγιμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης (ηλεκτρόδιο, πλάκα γείωσης, πλέγμα κλπ).

1.3.2 Ουδετέρωση

Αγώγιμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου.

1.3.3 Γείωση με αποζεύκτη διαφυγής τάσης

Αυτόματη απομόνωση μέρους της εγκατάστασης, στο οποίο η τάση ξεπερνά κάποιο προκαθορισμένο όριο.

1.3.4 Γείωση με αποζεύκτη διαφυγής έντασης

Αυτόματη απομόνωση μέρους της εγκατάστασης, στο οποίο το ρεύμα ξεπερνά κάποιο προκαθορισμένο όριο.

1.4 Αντίσταση Γείωσης

Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου για μια δοσμένη εκφόρτιση ρεύματος είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε ένα σημείο του ηλεκτροδίου και ενός απομακρυσμένου σημείου της επιφάνειας του εδάφους και του ρεύματος εκφόρτισης. Είναι, δηλαδή, η αντίσταση διαβάσεως από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το περιβάλλον έδαφος. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι ισοδύναμη με την ωμική αντίσταση του χωμάτινου περιβάλλοντος του ηλεκτροδίου και όχι της επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [8]. Συνεπώς, εξαρτάται άμεσα από τη μορφή και τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης, από το βάθος εγκατάστασης αυτών και την ειδική αντίσταση του εδάφους.

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Σε κρουστικές τάσεις 0,3/30μs, η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από τα 3Ω στα 26Ω. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση υπό κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση της μεταβατικής κατάστασης των γειώσεων, κατά τη διάρκεια της οποίας παρατηρείται προσωρινή αύξηση της αντίστασης γείωσης, ικανή να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα.

1.4.1 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την υγρασία, τη θερμοκρασία, την περιεκτικότητα σε προσμίξεις, τη μορφή της τάσης και το ηλεκτρικό ρεύμα. Ανάλογα με την τιμή της καθορίζεται το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος του συστήματος γείωσης, ώστε να έχουμε την επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης.

Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων. Εδάφη χωμάτινα, 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, μετρούμενη συνήθως σε Ωm. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική. Ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών καταγράφονται στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί:

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ (Ωm)
Ελώδες έδαφος	5-40
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	20-200
Αμμώδες	200-2500
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	2000-3000
Αποσαθρωμένος βράχος	Κάτω από 1000
Αμμόλιθος	2000-3000
Λιθώνας	Πάνω από 30000
Γρανίτης	Πάνω από 50000

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης [8, 9]

Σημαντική επίδραση έχει η υγρασία. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγώγιμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους [9].

Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός.

Η ειδική αντίσταση στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης επηρεάζεται από τη ροή ρεύματος από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από το ποσό υγρασίας στο έδαφος και τη θερμοκρασία του, καθώς και απότο μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα 200A/m² με διάρκεια 1s [10].

1.5 Τύποι και Μορφές Γειωτών

Ο γειωτής είναι αγωγός ή αγωγοί κάποιου γεωμετρικού σχήματος, ο οποίος ή οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο έδαφος, προκειμένου να εξασφαλίσουν την καλύτερη δυνατή επαφή με την γη και κατά συνέπεια την αποτελεσματικότερη διάχυση του ρεύματος σφάλματος στη γη.

Τα κυριότερα είδη γειωτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2 και περιγράφονται ακολούθως [5, 10]:



Σχήμα 1.2: Είδη γειωτών [10]

1.5.1 Γειωτής ράβδου

Ράβδος κυκλικής διατομής ή διατομής σταυρού, διαφόρων μηκών. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2,5m με μηχανικό ή απλό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Το άνω μέρος της ράβδου (περίπου 25cm), μπαίνει συνήθως σε φρεάτιο έτσι ώστε το σημείο σύνδεσής της με τον αγωγό γείωσης να είναι επισκέψιμο. Η τιμή της αντίστασης γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους και δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.

1.5.1.1 Γειωτής ράβδου κυκλικής διατομής

Κατασκευάζεται από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο, με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον 250μm έτσι ώστε να εμπίγνυται και στα πιο σκληρά εδάφη χωρίς να απογυμνώνεται η χαλύβδινη ψυχή, που θα έχει σαν αποτέλεσμα την γρήγορη διάβρωσή της. Ράβδοι με μικρότερο πάχος ηλεκτρολυτικής επιχάλκωσης ή επιχαλκωμένες μηχανικά με μανδύα χαλκού αποφεύγονται, οι μεν πρώτες για τον παραπάνω αναφερόμενο λόγο, οι δεύτερες διότι κατά την έμπηξη, ο χάλκινος μανδύας αποκολλάται και συγκεντρώνεται προς το άνω μέρος της ράβδου με αποτέλεσμα την αποκάλυψη της χαλύβδινης ψυχής και τη γρήγορη διάβρωσή της. Οι συνήθεις διαστάσεις των ραβδοειδών γειωτών κυκλικής διατομής κυμαίνονται από 12mm έως 23 mm σε διάμετρο και 1,2m έως 3 m σε μήκος. Οι ράβδοι κυκλικής διατομής συνήθως φέρουν σπείρωμα στο άνω και κάτω άκρο το οποίο δημιουργείται με διαμόρφωση και όχι με κοπή, αποφεύγοντας έτσι τον κίνδυνο αποκάλυψης της χαλύβδινης ψυχής της ράβδου με αποτέλεσμα την διάβρωσή της. Με το τρόπο αυτό, εφ' όσον οι συνθήκες το επιτρέπουν οι ράβδοι μπορούν να επιμηκυνθούν στο διπλάσιο, τριπλάσιο, κ.ο.κ του μήκους των, με την χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων επιμήκυνσης (μούφες). Οι σύνδεσμοι αυτοί δεν επιτρέπεται να κατασκευάζονται από άλλο υλικό όπως αλουμίνιο ή χάλυβα, προκειμένου να έχουν την κατάλληλη μηγανική αντοχή στη διάβρωση και πολύ μικρή αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος σφάλματος αντίστοιγα.

1.5.1.2 Γειωτής ράβδου διατομής σταυρού

Κατασκευάζεται από γαλβανισμένο χάλυβα, με πάχος επιψευδαργύρωσης τουλάχιστον 50μm. Όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος της επιψευδαργύρωσης του γειωτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του στην διάβρωση. Οι διαστάσεις του γειωτή είναι 5cm διάμετρος και μήκη 1,5m, 2m και 2,5m. Το πάχος των ελασμάτων που δημιουργούν την σταυροειδή διατομή είναι 3mm. Ο γειωτής πρέπει να φέρει στο άνω σημείο του συγκολλημένο διάτρητο έλασμα για την προσαρμογή του αγωγού γείωσης.

1.5.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου

Ταινία ή συρματόσχοινο διαφόρων διαστάσεων από χαλκό, γαλβανισμένο ή επιχαλκωμένο χάλυβα. Τοποθετείται κάθετα σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 50cm. Το βάθος που προτιμάται είναι 70-100cm για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόχου. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ταινίας που βρίσκεται εντός του εδάφους. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται αγωγός κυκλικής διατομής, αλλά συνήθως λόγω της μικρότερης επιφάνειας επαφής του με το έδαφος, η μετρούμενη τιμή αντίστασης γείωσης κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη ταινία ισοδυνάμου διατομής. Το συρματόσχοινο, επειδή διαβρώνεται εύκολα, δεν χρησιμοποιείται συνήθως σαν ηλεκτρόδιο γείωσης.

Οι συνήθεις διαστάσεις της ταινίας χαλκού είναι 30x2 mm, 30x3 mm και 40x3 mm. Οι συνήθεις διαστάσεις της χαλύβδινης ταινίας είναι 30x2 mm, 30x3,5 mm και 40x4 mm με επιφάνεια 500 f 300 gr/m^2 .

1.5.3 Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου διαφόρων διαστάσεων (ελάχιστο 500x500x2mm) η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 50cm με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις της πλάκας και όσο βαθύτερα τοποθετείται στο έδαφος. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2mm.

<u>1.5.4 Γειωτής ακτινικός</u>

Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Σχήμα 1.2). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια όπως στον γειωτή ταινίας.

<u>1.5.5 Γειωτής πλέγματος</u>

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 3-7m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5–1,0m. Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Επιτρέπονται και ανοίγματα μικρότερα από 3m, όμως παρουσιάζουν μεγαλύτερες βηματικές τάσεις σε σχέση με τα πλέγματα των 3m.

<u>1.5.6 Γειωτής τύπου "Ε"</u>

Ο γειωτής τύπου "Ε", όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, είναι ένα τυποποιημένο προϊόν της εταιρείας ΕΛΕΜΚΟ και αποτελείται ουσιαστικά από δύο στοιχεία. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αποτελούνται από πλάκες όπου αφού συναρμολογηθούν κατάλληλα μεταξύ τους, το πρώτο παίρνει την μορφή "Π" και το δεύτερο την μορφή "Γ", όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:





Σχήμα 1.3: Γειωτής τύπου Ε [5, 6]

Τα δύο στοιχεία συναρμολογούνται με μεταλλικές γωνίες, κοχλίες και περικόχλια M8 ανοξείδωτα τύπου A₂. Ύστερα από μετρήσεις και δοκιμές διαπιστώνεται ότι τα χαρακτηριστικά αντίστασης γείωσης είναι ανάλογα με αυτά 5 πλακών ίδιων διαστάσεων αλλά σε απόσταση τουλάχιστον 3m η μία από την άλλη, ή 6 ράβδων μήκους 1,5m σε απόσταση 4m η μία από την άλλη. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται: 1) όσο αυξάνεται το πλήθος των πλακών και εφόσον τοποθετούνται σε ικανή απόσταση μεταξύ των (>2m), 2) μεγαλώνουν οι διαστάσεις της πλάκας όσο βαθύτερα τοποθετείται στο έδαφος. Κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα (πάχος επιψευδαργύρωσης 50 μm). Ο γειωτής τύπου "Ε" μπορεί να επεκταθεί με περισσότερα στοιχεία "Γ" μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την επιτυγχανόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης.

1.5.7 Αντιστάσεις γειωτών

Οι αντιστάσεις των διαφόρων γειωτών φαίνονται στον Πίνακα 1.2:

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστι κός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d})$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \ m$	$R_A \cong rac{ ho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασσάλων α≥1 (κάτοψη)	$R_{A} \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ $R_{A1} = \text{antistash ends}$ πασσάλου	K=(11.5) για $n = 10: k \approx 1.2$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος h=0,51,0 m (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
S	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi}S}$		$R_4 = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$

	Πλέγμα σε βάθος			
	$0,5 - 1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$	$R_{A} \approx rac{ ho}{2d} + rac{ ho}{ m lg}$ $l \cdot g$ =συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$	
	(κάτοψη)			
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d}$ $\cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2D}{t}}{\ln \frac{8D}{d}} \right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$	
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m²]		$R = \frac{\rho}{4.5\alpha} **$	
	n=2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.27td} \right)$		
	n=3	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.25td} \right)$		
	n=4	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.22td} \right)$		
	n=5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.09td} \right)$		
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D} * * *$		
Όπου εμφα	ανίζεται το πάχος του ο	αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο	πάχος	
$d = \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi}}$, όπου Α η διατομή του αγωγού.				
*Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος				
D=0,33U , $U=$ μήκος αγωγού				
* *Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $a=\sqrt{S}$, όπου $S=$ επιφάνεια				
*** Για ένα γειωτι	*** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού			
γειωτή με $D=1.57\sqrt[3]{V}$				

Πίνακας 1.2: Αντιστάσεις γειωτών [11]

1.5.8 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές

Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους σε:

- Επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές
- Βαθείς γειωτές, π.χ. ράβδοι γείωσης

1.5.9 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30cm μέσα και 30cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδετέρου με χαλκό, ελάχιστης διατομής ίσης με τη διατομή του ουδετέρου όχι όμως μικρότερη των 16mm² μονόκλωνα. Σε εγκαταστάσεις αλεξικέραυνου η ελάχιστη διατομή για χαλκό είναι 50mm². Η σύνδεση του ουδετέρου του Μ/Σ με το γειωτή γίνεται με καλώδια διατομής 25mm² τουλάχιστον.

1.5.10 Ενδεικτική χρήση γειωτών

Σε μαλακά εδάφη συνίσταται η χρήση του γειωτή ράβδου. Σε βραχώδη εδάφη συνίσταται η χρήση γειωτή ταινίας χωρίς να αποκλείεται η χρήση του γειωτή ράβδου εφόσον μπορεί να ανοιχτεί οπή για την τοποθέτησή του. Σε περιπτώσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος κατασκευής γείωσης είναι περιορισμένος συνίσταται η χρήση του γειωτή τύπου "Ε" [6].

Το τυπικό σύστημα γείωσης λειτουργίας ενός υποσταθμού αποτελείται από ένα πλέγμα γείωσης, κατακόρυφες ράβδους γείωσης και άλλα μεταλλικά αντικείμενα τοποθετημένα στο έδαφος. Το τυπικό σύστημα γείωσης ενός πυλώνα του συστήματος μεταφοράς αποτελείται από ένα γειωτή ράβδου κυκλικής διατομής, οριζόντιες και κατακόρυφες ράβδους γείωσης, ενώ για ένα σπίτι το τυπικό σύστημα γείωσης αποτελείται από μία ή περισσότερες κατακόρυφες ράβδους γείωσης [4].

1.6 Συστήματα Γείωσης

Η επιλογή του είδους του συστήματος γείωσης εξαρτάται από το έδαφος (βραχώδες, αμμώδες, κλπ.), τον χρήσιμο χώρο, τις κλιματολογικές συνθήκες, το κόστος κλπ. Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη είναι: πολυγωνική (τριγωνική κλπ) διάταξη, σύστημα γείωσης με πλάκες, περιμετρική γείωση, θεμελιακή γείωση, γείωση τύπου "Ε" ή και συνδυασμός ορισμένων από αυτά.

<u>1.6.1 Πολυγωνική διάταξη γείωσης</u>

Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές οι οποίοι τοποθετούνται στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου συνήθως δε τριγώνου (τριγωνική γείωση). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης αναλόγου διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως 50mm² Cu). Η απόσταση μεταξύ των ράβδων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορά του βάθους έμπηξης.

Πολλές φορές λόγω έλλειψης χώρου ή ευκολίας, αντί της πολυγωνικής διάταξης οι ράβδοι μπορούν να τοποθετηθούν σε ευθεία διάταξη, σε "Τ" διάταξη, σε κυκλική διάταξη κ.λ.π. πάντα όμως θα πρέπει η απόσταση μεταξύ των να είναι τουλάχιστον 1,5 φορά του βάθους έμπηξής των.

<u>1.6.2 Γείωση με πλάκες</u>

Κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη αρκεί η απόσταση μεταξύ των να είναι τουλάχιστον 3m. Οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης αναλόγου διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως 50mm² Cu).

<u>1.6.3 Περιμετρική γείωση</u>

Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας ο οποίος τοποθετείται σε όρυγμα βάθους 50cm έως 70cm συνήθως για να υπάρχει υγρό έδαφος περιμετρικά του κτηρίου, και σε απόσταση από το κτήριο περίπου 2m διότι τα χώματα κοντά στο κτήριο συνήθως δεν είναι αγώγιμα (μπάζα).

<u>1.6.4 Θεμελιακή γείωση</u>

Θεμελιακή γείωση κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα από αγωγό κυκλικής διατομής, που τοποθετείται εντός των συνδετήριων δοκαριών των πεδίλων ή στα περιμετρικά τοιχεία των θεμελίων του κτηρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου και στηρίζεται-συνδέεται ηλεκτρικά αγώγιμα στον οπλισμό με συνδέσμους που πρέπει να ικανοποιούν απαιτήσεις Ευρωπαϊκών και Διεθνών Προτύπων. Στα κτήρια μεγάλης περιμέτρου συνίσταται η τοποθέτηση εγκάρσιων ή διαμηκών

τμημάτων ταινίας (πάντα εντός σκυροδέματος θεμελίων), έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει περισσότερο από 10m από το γειωτή.



Σχήμα 1.4: Θεμελιακή γείωση [7]

Η θεμελιακή γείωση έναντι των συμβατικών τύπων γείωσης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- (α) Χαμηλή τιμή αντίσταση γείωσης
- (β) Αντοχή στο χρόνο Μηχανική προστασία
- (γ) Αναμονές γείωσης σε οποιοδήποτε σημείο του εσωτερικού κτιρίου.

(δ) Η εγκατάσταση θεμελιακής γείωσης γίνεται σε ήδη υπάρχουσα εκσκαφή με αποτέλεσμα την ευκολία τοποθέτησης.

Για τους παραπάνω λόγους η εγκατάσταση θεμελιακής γείωσης επιβάλλεται από τους κανονισμούς και προτείνεται από το K.E.H.E. [12] για κάθε νεοαναγειρόμενο κτίριο.

1.6.5 Γείωση με γειωτή τύπου "Ε"

Κατασκευάζεται από ένα στοιχείο "Π" και ένα ή παραπάνω στοιχεία "Γ" και τοποθετείται εντός σκάμματος βάθους τουλάχιστον 1m, πλάτους τουλάχιστον 75cm και μήκος αναλόγως του αριθμού των στοιχειών "Γ" που θα τοποθετηθούν.

<u>1.6.6 Συνδυασμός γειώσεων</u>

Η τιμή της αντίστασης εξαρτάται από το μήκος και την επιφάνεια του ηλεκτροδίου που έρχεται σε επαφή με το υπέδαφος. Πολλές φορές λόγω μεγάλης ειδικής αντίστασης του υπεδάφους (βραχώδες, ξηρή άμμος κ.λ.π.) αλλά και περιορισμένου

διαθέσιμου για γείωση χώρου, απαιτείται να γίνει κάποιος συνδυασμός από τα παραπάνω είδη γείωσης τέτοιος ώστε να πετυχαίνουμε "αύξηση" του μήκος του γειωτή χωρίς να απαιτείται επί πλέον χώρος. Το συνηθέστερο παράδειγμα είναι της περιμετρικής γείωσης η οποία συντάσσεται με ράβδους γείωσης κατά μήκους αυτής.

1.7 Βελτιωτικά Υλικά Γειώσεων

Πολλές φορές κατά την κατασκευή ενός συστήματος γείωσης είναι απαραίτητη η χρήση βελτιωτικού υλικού. Οι λόγοι που οδηγούν στην απόφαση αυτή είναι οι παρακάτω :

- Μεγάλη ειδική αντίσταση του εδάφους
- Περιορισμένος χώρος εγκατάστασης
- Ιδιαίτερα διαβρωτικό έδαφος
- Ασταθείς καιρικές συνθήκες και αυξομειώσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά την διάρκεια του έτους
- Μείωση του κόστους
- Συνδυασμός των παραπάνω

Εμπειρικά χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά που ενώ βελτιώνουν την τιμή της αντίστασης γείωσης πρόσκαιρα, με την πάροδο του χρόνου προκαλούν τελείως αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η χρήση NaCl (χονδρό αλάτι) πρός συγκράτηση, διαβρώνει το ηλεκτρόδιο μεγαλώνοντας την αντίσταση διάχυσης, δηλαδή την δυσκολία με την οποία διαχέεται το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Το βρόχινο νερό που θα διαπεράσει το έδαφος θα παρασύρει το αλάτι με αποτέλεσμα μετά από κάποια χρονική στιγμή να μην υφίσταται πια. Για τον τελευταίο λόγο δεν προτείνεται και η λύση γαιάνθρακα. Η χρήση δε ρινισμάτων σιδήρου λόγο οξείδωσής των, προκαλεί με την πάροδο του χρόνου επίσης αρνητικά αποτελέσματα. Η χρήση μπετονίτη είναι ακατάλληλη για περιόδους ξηρασίας διότι συρρικνώνεται και αποκολλάται από το γειωτή [5].

1.8 Βασικές Έννοιες

Αντίσταση γειώσεως

Για ένα ηλεκτρόδιο ή σύστημα γείωσης είναι η αντίσταση προς την άπειρη γη [13].

<u>Άπειρη γη</u>

Είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται μηδενική. Για πρακτικούς σκοπούς, η «άπειρη απόσταση» είναι 5-10 φορές επί τη μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή [13].

Αποτελεσματική γείωση

Έτσι ονομάζεται μια γείωση που καθιστά αδύνατη την εκδήλωση επικίνδυνων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων στην περιοχή που καλύπτει [13].

Αποτελεσματικό ή ενεργό μήκος

Το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού ή «ωφέλιμου» μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, και μειώνεται τόσο περισσότερο όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής [14].

<u>Αποτελεσματική περιοχή</u>

Η περιοχή του συστήματος που επηρεάζει την κρουστική σύνθετη αντίστασή του [4].

<u>Βηματική τάση Us</u>

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 Error! Reference source not found.

Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής

Ηλεκτρόδιο τοποθετημένο μέσα στο έδαφος μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη [13].

Ισοδυναμικές επιφάνειες

Αποτελούν τρόπο αναπαράστασης του ηλεκτρικού πεδίου. Αν Φ είναι η συνάρτηση δυναμικού τότε ισοδυναμικές επιφάνειες ορίζονται οι επιφάνειες εκείνες που περιγράφονται από την εξίσωση: $\Phi(x, y, z) = c$ (όπου c είναι μια σταθερά) [13].

Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η αυξημένη σε σχέση με τη μόνιμη κατάσταση σύνθετη αντίσταση του συστήματος κατά την περίπτωση της διέλευσης από αυτό ενός κρουστικού ρεύματος. Είναι αποτέλεσμα της έγχυσης στο σύστημα όρων ιδιαίτερα υψηλών συχνοτήτων που κάνουν σημαντική την επίδραση της επαγωγής με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας διαφορετικής και υψηλότερης τιμής της σύνθετης αντίστασης [4].

Μεταλλικά αντικείμενα

Ονομάζονται τα αγώγιμα εξαρτήματα των εγκαταστάσεων ή συσκευών, που δεν είναι μονωμένα προς το περιβάλλον και που σε κανονική κατάσταση λειτουργίας δεν έχουν τάση προς τη γη [8].

<u>Ουδετέρωση</u>

Η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων των συσκευών ή των στοιχείων του δικτύου με τον ουδέτερο αγωγό [10].

Πλέγμα γείωσης

Σύστημα από οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης που αποτελούνται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων αγωγών θαμμένων στο έδαφος και συνιστούν γείωση για ηλεκτρικές ή μεταλλικές συσκευές. Το σύστημα αυτό περιορίζεται σε μια ορισμένη περιοχή και σκοπό έχει να εξασφαλίσει «αποτελεσματική γείωση» [10, 13].

Πολυστρωματική δομή εδάφους

Ανομοιογενές έδαφος που μοντελοποιείται με τουλάχιστον δύο οριζόντια ή κατακόρυφα στρώματα. Κάθε στρώμα έχει ξεχωριστή ομοιογενή ειδική αντίσταση [10].

<u>Τάση επαφής U</u>t

Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός γειωμένου μεταλλικού ικριώματος και ενός σημείου της επιφάνειας της γης σε οριζόντια απόσταση 1m Error! Reference source not found.

<u>Τάση επαφής μεταξύ μετάλλων</u>

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικών κατασκευών ενός υποσταθμού σε περίπτωση έμμεσης σύνδεσής τους μέσω των μελών ενός ανθρώπου (χέρια, πόδια) [10].

Τάση ηλεκτροδίου γείωσης

Είναι η τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου, όταν ρέει ρεύμα μέσω του ηλεκτροδίου [13].

<u>Τάση σφάλματος ή Δυναμικό προς άπειρη γη U_f</u>

Είναι η τάση που εμφανίζεται μεταξύ των προσιτών αγώγιμων στοιχείων, τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του κυκλώματος αλλά είναι δυνατόν να βρεθούν υπό τάση λόγω βλάβης της μόνωσης και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου [13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

2.1 Γενικά

Στο παρελθόν έχει μελετηθεί εκτενώς η συμπεριφορά γειώσεων με απλή γεωμετρία όταν από αυτές διαχέεται ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας προς το έδαφος. Σε πολλά πρότυπα αλλά και επιστημονικές δημοσιεύσεις δίνονται μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού της αντίστασης γείωσης αλλά και των αναπτυσσόμενων τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους κοντά στο σύστημα γείωσης. Αναφορικά με τη μεταβατική συμπεριφορά των γειώσεων όμως στη βιβλιογραφία δίνονται συνήθως προσεγγιστικές σχέσεις υπολογισμού, όπου η επίδραση της χωρητικής και της επαγωγικής συνιστώσας συνήθως αμελείται, δίνοντας έτσι ακριβή αποτελέσματα μόνο στις περιπτώσεις όπου μήκος των συστημάτων γείωσης είναι γενικά μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος στο έδαφος.

Στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, λοιπόν, τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα, διότι η αντίσταση των συστημάτων γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στη μόνιμη κατάσταση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μεταβατική κατάσταση [13]:

- η αντίδραση (φανταστική αντίσταση) των αγωγών και των συνδέσεων γίνεται μεγαλύτερη λόγω της μικρής διάρκειας του φαινομένου: η μικρή διάρκεια του φαινομένου έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη υψηλών συχνοτήτων και, επομένως, την αύξηση της σύνθετης αντίστασης της γείωσης
- η μείωση του χρόνου μετώπου της διέγερσης συντελεί στη μείωση του «αποτελεσματικού μήκους» (effective length) των μεγάλου μήκους αγωγών γείωσης
- το επιδερμικό φαινόμενο αυξάνει τη σύνθετη αντίσταση των αγωγών γείωσης,
 εξαιτίας της υψηλής συχνότητας κατά το μεταβατικό φαινόμενο
- η υψηλή τιμή του εγχυόμενου ρεύματος μπορεί να ξηράνει το έδαφος, με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασής του

Οι παράγοντες που επιδρούν στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης είναι: η μορφή του συστήματος γείωσης, η ειδική αντίσταση του χώματος που το περιβάλλει, η ύπαρξη ή όχι ιονισμού στο έδαφος, το σημείο έγχυσης, καθώς και η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος.

Πέραν της μελέτης για τη μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης, πολλές εργασίες έχουν ασχοληθεί με την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων γείωσης. Αυτή έχει ως αντικείμενο τα μεμονωμένα ηλεκτρόδια ανεξάρτητα από κάθε άλλο σύστημα ή μέρος συστήματος γείωσης. Ενδεικτική είναι η εργασία των S. S. Devgan και E. R. Whitehead [16], που αναφέρεται σε μεθοδολογία υπολογισμού της μεταβατικής απόκρισης ηλεκτροδίων γείωσης σε διπλοεκθετικής μορφής κρουστικό κύμα διέγερσης.

2.2 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 [13]:

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \tag{2.2.1}$$

Είναι μία συνάρτηση της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου, των επικρατουσών συνθηκών εδάφους και της κυματομορφής του μεταβατικού ρεύματος. Μπορεί να καθοριστεί αν το ρεύμα και η απόλυτη τάση στο σημείο έγχυσης του ρεύματος είναι γνωστά για τη χρονική περίοδο που μας ενδιαφέρει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ενώ είναι σημαντικό οι μετρήσεις των u(t) και i(t) να είναι συγχρονισμένες, αλλιώς οποιαδήποτε χρονική καθυστέρηση πρέπει να ληφθεί υπόψη [17]:



Σχήμα 2.1: Μέτρηση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης [17]

Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων της. Οι σχέσεις (2.2.2)-(2.2.5) εκφράζουν τους ορισμούς των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 [13]:

$$Z_1 = \max(z(t)) \tag{2.2.2}$$

$$Z_2 = \frac{U_{\text{max}}}{i_{U_{\text{max}}}} \tag{2.2.3}$$

$$Z_3 = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}}$$
(2.2.4)

$$Z_4 = \frac{U_{I\max}}{I_{\max}} \tag{2.2.5}$$

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

Z₂ είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς το ρεύμα τη στιγμή κατά την οποία η τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της

Z₃ είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος

Z₄ είναι ο λόγος της τιμής της τάσης όταν το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης:



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης [13]

Μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται η παράμετρος που θα μετρηθεί, π.χ. η παράμετρος Z_3 προτιμάται πολλές φορές λόγω της απλότητάς της, ενώ στις περιπτώσεις εκείνες που το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του πριν από το μέγιστο της τάσης η παράμετρος Z_4 , σύμφωνα με τον K. J. Nixon [18], είναι η καταλληλότερη για να περιγράψει τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές αντικεραυνικής προστασίας η μέτρηση της Z_3 δεν είναι εφικτή και έτσι μετράται απλά η αντίσταση γείωσης. Επειδή η μέτρηση γίνεται με όργανα που συνήθως εφαρμόζουν ένα σήμα συχνότητας κάτω από 1kHz, η αντίσταση αυτή είναι γνωστή ως αντίσταση χαμηλής συχνότητας R_{LF} . Ο λόγος Z_3/R_{LF} για μία δοθείσα διάταξη ηλεκτροδίων, γνωστός ως συντελεστής μετάβασης, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η παράμετρος Z_3 από τη μετρηθείσα αντίσταση R_{LF} . Λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες σχετικά με το έδαφος, ο συντελεστής αυτός συχνά θεωρείται ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας, λόγω της συντηρητικής προσέγγισης που θέλει τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση μεγαλύτερη της αντίστασης χαμηλής συχνότητας.

Σύμφωνα, όμως, με την πρόσφατη εργασία των S. Visacro και G. Rosado [19], φάνηκε ότι ο συντελεστής αυτός δεν είναι πάντα ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδος, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα πολλών προσομοιώσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας κατέληξαν σε συντελεστές σημαντικά μικρότερους της μονάδος για ηλεκτρόδια μικρότερα από το αποτελεσματικό μήκος, ακόμα και σε χαμηλής αντίστασης εδάφη. Συγκεκριμένα, ο λόγος Z₃/ R_{LF} κυμάνθηκε στις περιοχές 0.3-0.6 και 0.68-0.9, για ηλεκτρόδια θαμμένα σε εδάφη υψηλής (3,8-4kΩm) και χαμηλής (90-300Ωm) αντίστασης, αντίστοιχα. Τέλος, ηλεκτρόδια μακρύτερα του αποτελεσματικού μήκους Lef είχαν τιμές συντελεστή μετάβασης μεγαλύτερες της μονάδας, αν και εμφανώς μικρότερες από τις προβλεπόμενες μέσω προσομοιώσεων. Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση (η τιμή που μετριέται με ένα γειωσόμετρο). Επομένως, το ζητούμενο για ένα κατασκευαστή συστημάτων γείωσης, δεν είναι η τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση, αλλά η χρονική μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης έως ότου καταλήξει, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, στην τιμή της μονίμου καταστάσεως.

22

2.3 Μέθοδοι και Μοντέλα Προσομοίωσης

2.3.1 Αναλυτικές και εμπειρικές μέθοδοι

Πειραματική και θεωρητική έρευνα της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης σε «χτύπημα» από κεραυνό πραγματοποίησε πρώτος ο L. V. Bewley to 1934 [20]. Η εργασία του ήταν μέρος της έρευνας για την αντικεραυνική προστασία δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτήν υπολόγισε τη σύνθετη αντίσταση ενός οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire) στο σημείο εφαρμογής μίας μοναδιαίας βηματικής τάσης. Αυτή η σύνθετη αντίσταση υπολογίστηκε με την υπόθεση ότι ο αγωγός είναι μία μεγάλου μήκους παραμέτρους. Ο Bewley έδειξε ότι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση του αγωγού διαμορφώνεται από τη μετάβαση από μία αρχική ιδιαίτερα υψηλή σύνθετη αντίσταση σε μία πολύ χαμηλή τελική αντίσταση του εδάφους και την τιμή της υπέρτασης.

Το 1943 οι P. L. Bellaschi και Armingtom υπολόγισαν αναλυτικά την απόκριση τάσης ηλεκτροδίων γείωσης στο σημείο εγχύσεως μεταβατικών ρευμάτων διαφόρων κυματομορφών [21]. Έδωσαν τις εκφράσεις για την τάση που αναπτύσσεται με μία πρόοδο αργής σύγκλισης, αγνοώντας τις χωρητικότητες στο μοντέλο τους σε αντίθεση με τον Bewley. Επίσης, επισήμαναν στην εργασία τους ότι για μεγάλου μήκους ηλεκτρόδιο γείωσης, το ισοδύναμο κύκλωμα με κατανεμημένη αντίσταση γείωσης και επαγωγική αντίσταση αγωγού είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό της μεταβατικής σύνθετης αντίστασής του.

Ένα, όμως, από τα πιο σημαντικά και κλασσικά εγχειρίδια για τα συστήματα γείωσης γράφτηκε από τον Ε. D. Sunde [22] το 1949, το οποίο ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται από πολλούς ασκούμενους μηχανικούς για την επίλυση προβλημάτων γείωσης. Η προσέγγιση του για την περιγραφή ενός συστήματος γείωσης βασίζεται στη θεωρία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ξεκινώντας από τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell. Στην εργασία του όχι μόνο υπολογίζει την αντίσταση σταθερού ρεύματος (DC) για διάφορες δομές γείωσης, αλλά δίνει επίσης μια διεξοδική θεωρία της επαγωγικής συμπεριφοράς αγωγών γείωσης υπό υψηλή συχνότητα. Ο Sunde ήταν ίσως ο πρώτος που παρουσίασε την έννοια της γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες από τη συχνότητα ανά μονάδα μήκους παραμέτρους. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός

οριζόντιου αγωγού γείωσης πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, όταν αυτός δέχεται άμεσα κεραυνικά «χτυπήματα», με χρήση των τηλεγραφικών εξισώσεων που δίνονται ακολούθως:

$$\frac{dI(x,j\omega)}{dx} = -YV(x,j\omega)$$
(2.3.1)

$$\frac{dV(x,j\omega)}{dx} = -ZI(x,j\omega)$$
(2.3.2)

όπου Z είναι η ανά μονάδα μήκους διαμήκης σύνθετη αντίσταση και Y η ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αγωγιμότητα του αγωγού.

Είναι φανερό από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω ότι η μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης ξεκίνησε από τη θεωρία γραμμής μεταφοράς, και «παράχθηκε» αναλυτικά κάτω από ορισμένες προσεγγίσεις για γρήγορες λύσεις λόγω έλλειψης δυνατών υπολογιστικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό αυτές οι μέθοδοι / μοντέλα περιορίστηκαν σε απλά συστήματα γείωσης π.χ. οριζόντιοι αγωγοί γείωσης ή απλά ηλεκτρόδια γείωσης. Για πολύπλοκα συστήματα γείωσης, όπως μεγάλα πλέγματα γείωσης, μόνο η εμπειρική ανάλυση θα μπορούσε να βοηθήσει, η οποία επιχειρήθηκε από τους Β. G. Gupta και Β. Thapar [23] το 1980 για τον υπολογισμό της απόκρισης πλεγμάτων γείωσης σε μοναδιαία βηματικά ρεύματα.

2.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Από τις αρχές της δεκαετίας του '80, η δύναμη των υπολογιστών αυξήθηκε δραματικά, δίνοντας σε όλα σχεδόν τα ερευνητικά πεδία της επιστήμης του μηχανικού τη δυνατότητα επίλυσης πολύπλοκων πρακτικών προβλημάτων έχοντας ως βάση διάφορες ισχυρές αριθμητικές μεθόδους. Κατά συνέπεια, η μοντελοποίηση της πολύπλοκης μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης σε περίπτωση ισχυρού ρεύματος σφάλματος είχε καλύτερο μέλλον κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Τα αρχικά μοντέλα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.3.1 ξεκινούσαν από διάφορες υποθέσεις προκειμένου να φτάσουν σε απλές εξισώσεις. Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, οι περισσότερες πολύπλοκες εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν.
- Πρακτικά πολύπλοκα συστήματα γείωσης μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν χάρη στη μεγάλη μνήμη και ταχύτητα του υπολογιστή.

24

Οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι μοντελοποίησης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, που αναπτύχθηκαν από το 1980 μέχρι σήμερα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- Κυκλωματική προσέγγιση
- Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου
 - Μέθοδος Στιγμών
 - Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
- Υβριδική προσέγγιση
- Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

2.3.2.1 Κυκλωματική προσέγγιση

Ένα από τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιείται συχνά για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με πολύπλοκη γεωμετρία είναι η κυκλωματική προσέγγιση (circuit approach). Τα κύρια βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Χωρισμός του συστήματος γείωσης σε πολλά πεπερασμένα τμήματα.
- Δημιουργία του ισοδύναμου συγκεντρωτικού κυκλώματος για κάθε τμήμα και υπολογισμός των παραμέτρων του: αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή (ΔL), χωρητικότητα (ΔC), αγωγιμότητα (ΔG) και εσωτερική αντίσταση (Δr_e).
- Επίλυση των εξισώσεων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος που αντιπροσωπεύει ολόκληρο το σύστημα γείωσης βάσει των νόμων Kirchoff. Οι εξισώσεις κόμβων μπορούν να εμφανιστούν σε διαφορετικές μορφές ανάλογα με το ισοδύναμο κύκλωμα που έχει υιοθετηθεί για τη μοντελοποίηση.

Η κυκλωματική προσέγγιση για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Α. Ρ. Meliopoulos και Μ. G. Moharam [24] το 1983. Χρησιμοποίησε παραμέτρους ανεξάρτητες της συχνότητας για κάθε τμήμα (ΔL, ΔC, ΔG, Δr_e), οι οποίες υπολογίζονται με βάση την εξίσωση Laplace ($\nabla^2 V = 0$) στο ημι-άπειρο αγώγιμο μέσο της γης. Το ενδιαφέρον σε αυτή την εργασία είναι ότι κάθε τμήμα του αγωγού γείωσης αντικαταστάθηκε από μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και από δύο επιπλέον αγωγιμότητες διαρροής προς γη σε διακλάδωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 (α), και το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί στο κύκλωμα του Σχήματος 2.3 (β):




Σχήματα 2.3 (α) και (β): Ισοδύναμο κύκλωμα για κάθε τμήμα στην κυκλωματική προσέγγιση του Meliopoulos [25]

Η εξίσωση κόμβων για το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.3 είναι:

$$[Y] \cdot [V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, ...)]$$
(2.3.3)

όπου [Y] είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος, [V(t)] είναι το διάνυσμα τάσης στο χρόνο t για τους κόμβους, $[I_s(t)]$ είναι το διάνυσμα του εξωτερικού ρεύματος που εισάγεται στους κόμβους του κυκλώματος και $[b(t - \Delta t,...)]$ είναι το διάνυσμα προηγούμενων τιμών ρεύματος (current history).

Αργότερα σαν επέκταση της εργασίας του στο [24], ο Α. Ρ. Meliopoulos σε συνεργασία με τον Α. D. Papalexopoulos βελτίωσε την κυκλωματική προσέγγιση συστήματος γείωσης για αντικεραυνικές μελέτες υπολογίζοντας την απόκριση κάθε τμήματος σε οποιαδήποτε υπερδιέγερση ρεύματος βασιζόμενος στις μερικώς στατικές εξισώσεις Maxwell [26], έτσι ώστε οι παράμετροι κάθε τμήματος και οι προηγούμενες τιμές ρεύματος να είναι εξαρτώμενες από τη συχνότητα.

To 1989, οι M. Ramamoorty, M. M. Babu Narayanan και S. Parameswaran ανέπτυξαν ένα απλοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο για το πλέγμα γείωσης [27]. Στην προσέγγισή τους, μετά τη διαίρεση ολόκληρου του συστήματος γείωσης σε n τμήματα, κάθε τμήμα αντικαταστάθηκε από ένα συγκεντρωτικό κύκλωμα με μόνο

αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές (ΔL) και αγωγιμότητες διαρροής προς γη (ΔG), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4:



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός τετραγωνικού στοιχείου πλέγματος γείωσης [25]

Η εξίσωση κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχήματος 2.4 είναι:

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1} [V] \right\}$$
(2.3.4)

όπου [V] είναι το διάνυσμα τάσεων κόμβων, $[I_s]$ είναι το διάνυσμα ρεύματος έγχυσης κόμβων, [G] είναι το διάνυσμα αγωγιμοτήτων κόμβων και [L] το διάνυσμα επαγωγικών αντιστάσεων κόμβων. Παρά το γεγονός ότι αυτό το μοντέλο αγνοεί τη χωρητική σύζευξη, παραμένει ακριβές για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης σε εδάφη χαμηλών ειδικών αντιστάσεων.

Το 1999, δύο τροποποιήσεις της κυκλωματικής προσέγγισης των εργασιών του Α. Ρ. Meliopoulos δημοσιεύτηκαν από τους Α. Geri [28] και Α. F. Otero, J. Cidras, J. L. del Alamo [29], αντίστοιχα, οι οποίοι συμπεριέλαβαν και φαινόμενα ιονισμού του εδάφους στα μοντέλα τους.

Η κυκλωματική προσέγγιση είναι εύκολη στην κατανόηση από την άποψη ότι η πολύπλοκη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης μετασχηματίζεται σε μία απλή μεταβατική ανάλυση ισοδύναμων κυκλωμάτων. Αυτός ο μετασχηματισμός κάνει το πρόβλημα πιο παρατηρήσιμο. Οι κυκλωματικές προσεγγίσεις μπορούν να συμπεριλάβουν όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στους αγωγούς γείωσης, ενώ μπορούν εύκολα να ενσωματώσουν και τα μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος.

2.3.2.2 Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι η πιο ενδελεχής μέθοδος μοντελοποίησης μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης, επειδή επιλύει πλήρεις εξισώσεις Maxwell με ελάχιστες προσεγγίσεις. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τη <u>Μέθοδο Στιγμών (Method of Moment – MoM)</u> είτε με τη <u>Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM)</u>.

<u>Μέθοδος Στιγμών</u>: Το βασιζόμενο στη Μέθοδο Στιγμών μοντέλο για τη μεταβατική συμπεριφορά συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους L. Grcev και F. Dawalibi [30] το 1990. Η μέθοδος ξεκινά από την ολοκληρωτική εξίσωση του Maxwell για το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E^{s} = \frac{1}{4\pi j\omega\varepsilon} \left(\nabla\nabla - \gamma^{2}\right) \int_{l} t' \cdot I_{l}(r') G_{n}(r,r') dl \qquad (2.3.5)$$

όπου:

$$G_n(r,r') = G_1(r,r') + G_i(r,r') + G_s(r,r')$$
(2.3.6)

όπου E^s είναι το συνολικό διασκορπισμένο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού, $t' \cdot I_i(r')$ είναι το ρεύμα που ρέει κατά μήκος του αγωγού, $\varepsilon = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ είναι η μιγαδική επιτρεπτότητα του μέσου, $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$ είναι η σταθερά διάδοσης κύματος στο μέσο, όπου σ , ε και μ είναι η αγωγιμότητα, επιτρεπτότητα και διαπερατότητα αντίστοιχα, $G_n(r,r')$ είναι η πλήρης συνάρτηση Green, $G_1(r,r')$ και $G_i(r,r')$ είναι οι δυαδικές συναρτήσεις Green για το ηλεκτρικό πεδίο στο r λόγω του στοιχείου ρεύματος και της εικόνας του, και $G_s(r,r')$ είναι απαραίτητος για την πλήρη επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η οριακή συνθήκη είναι ότι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού γείωσης πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$t \cdot \left(E^{i} + E^{s}\right) = I \cdot Z_{s} \cdot \Delta l \tag{2.3.7}$$

όπου E^i είναι το αναμενόμενο ηλεκτρικό πεδίο και Z_s είναι η ανα μονάδα μήκους εσωτερική σύνθετη αντίσταση σε σειρά του αγωγού γείωσης συμπεριλαμβανομένου του επιδερμικού φαινομένου.

Η αριθμητική επεξεργασία της εξίσωσης (2.3.7) καλείται Μέθοδος Στιγμών, που δεν είναι τίποτε άλλο από το μετασχηματισμό της σχετικής ολοκληρωτικής εξίσωσης σε ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους, όπου οι N άγνωστοι συνήθως αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές του ρεύματος βάσει μερικών κατάλληλων επεκτάσεων. Ανάλογα, λοιπόν, με τη διανομή του ρεύματος κατά μήκος του αγωγού που προσεγγίζεται, διαμορφώνεται και η αντίστοιχη ολοκληρωτική εξίσωση (2.3.5) για το ηλεκτρικό πεδίο.

Αν οι πηγές ρεύματος για όλα τα τμήματα του αγωγού γείωσης είναι γνωστές, το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το σύστημα γείωσης και το ρεύμα διαρροής από το τμήμα του αγωγού γείωσης προς το έδαφος μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με χρήση στοιχειωδών εξισώσεων για τη σχετική πηγή και μέσο. Το δυναμικό σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του αγωγού γείωσης μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση του κανονικού ηλεκτρικού πεδίου από το σημείο της επιφάνειας του αγωγού προς την απομακρυσμένη γη.

Καθώς η βασισμένη στη Μέθοδο Στιγμών προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επιλύει πλήρεις εξισώσεις Maxwell στο πεδίο της συχνότητας, έχει ελάχιστες παραδοχές. Κατά συνέπεια, πιστεύεται ότι είναι πολύ ακριβής. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των πηγών εισόδου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι αρκετά πολύπλοκο για να υλοποιηθεί. Επίσης, όταν η δομή της γείωσης είναι μεγάλη, ο χρόνος υπολογισμού γίνεται και αυτός πολύ μεγάλος. Ένα ακόμα μειονέκτημα της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι, λόγω της διαδικασίας επίλυσης στο πεδίο της συχνότητας, δεν μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να συμπεριλάβει τη μη γραμμικότητα κατά τον ιονισμό του εδάφους, και να συνδυάσει άλλες μη γραμμικές διατάξεις που έχουν μοντέλα στο πεδίο του χρόνου.

<u>Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων</u>: Είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται στο πρόγραμμα (OPERA) που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση στην παρούσα διπλωματική εργασία. Για τη μεταβατική ανάλυση στο OPERA αναφερόμαστε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3.

29

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε από τους B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier και R. Feuillet, [31] το 1995. Το μοντέλο ξεκινά από εξισώσεις ηλεκτρικής ή μαγνητικής ενέργειας, οι οποίες εμπεριέχουν μερικώς διαφορικές εξισώσεις Maxwell αναφορικά με το διανυσματικό δυναμικό (\vec{A}) και το βαθμωτό δυναμικό (V) σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος. Υλοποιείται, έπειτα, με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων για τις λύσεις που βασίζονται στη φυσική αρχή ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο σύστημα. Οι τελικές συναρτήσεις A - V δίνονται από τις εξισώσεις (2.3.8)-(2.3.10), οι οποίες εμπεριέχουν τη συνάρτηση βάρους \vec{W} και w για το διανυσματικό και βαθμωτό δυναμικό αντίστοιχα:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_0} \left(\nabla \times \vec{W} \right) \cdot \left(\nabla \times \vec{A} \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(\nabla \cdot \vec{W} \right) \left(\nabla \cdot \vec{A} \right) + \left(\sigma_{soil} + j \omega \varepsilon_{soil} \right) \left(j \omega \vec{W} \cdot \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V \right) \right] d\Omega = 0 \quad (2.3.8)$$

$$\int_{\Omega} \left[\left(\sigma_{soil} + j \omega \varepsilon_{soil} \right) \nabla w \cdot \left(j \omega \vec{A} + \nabla V \right) \right] d\Omega = 0$$
(2.3.9)

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times w) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W}) (\nabla \cdot \vec{A}) \right] d\Omega = 0$$
(2.3.10)

Οι (2.3.8) και (2.3.9) αφορούν το πεδίο στο έδαφος ενώ η (2.3.10) το πεδίο στον αέρα. Προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα αριθμητικά οι εξισώσεις (2.3.8)-(2.3.10) μετασχηματίζονται σε γραμμικές εξισώσεις με διαίρεση ολόκληρου του συστήματος σε N μικρά στοιχεία. Η δυσκολία σε αυτήν την προσέγγιση έγκειται στο μετασχηματισμό των ανοιχτών ορίων του περιβάλλοντος τόσο του αέρα όσο και της γης σε ένα κλειστό οριακό πρόβλημα με χρήση χωρικού μετασχηματισμού, ο οποίος θα μειώσει το μέγεθος του προβλήματος. Το κύριο πλεονέκτημα της βασισμένης στη FEM προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι η περιγραφή της περιοχής (γεωμετρία του μέσου) του προβλήματος διευκολύνεται από ιδιαίτερα ευέλικτα μη ομοιόμορφα στοιχεία, που μπορούν εύκολα να περιγράψουν πολύπλοκα σχήματα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο ιονισμός του εδάφους μπορεί εύκολα να συμπεριληφθεί στο συγκεκριμένο μοντέλο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ακόμα πιο περίπλοκη στην κατανόηση από αυτή που βασίζεται στη MoM, επειδή δεν λύνει απευθείας τις εξισώσεις Maxwell.

2.3.2.3 Υβριδική προσέγγιση

Η υβριδική προσέγγιση για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης ξεκίνησε αρχικά από τον F. Dawalibi [32] το 1986, και αργότερα τροποποιήθηκε το 2000 από τους R. Andolfato, L. Bernardi και L. Fellin [33]. Εδώ, η λέξη «υβριδική» σημαίνει ότι η προσέγγιση αυτή αποτελεί συνδυασμό της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης. Η μεθοδολογία του μοντέλου αυτού έγκειται στη διαίρεση ολόκληρου του συστήματος γείωσης σε n μικρά τμήματα, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο δίνεται από την εξίσωση (2.3.11), η οποία προκύπτει από τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell:

$$E = -gradV - j\omega \vec{A} \tag{2.3.11}$$

όπου \vec{A} είναι το διανυσματικό δυναμικό και V το βαθμωτό δυναμικό, ενώ η εξίσωση μετασχηματίζεται κατάλληλα σε κάθε τμήμα k.

Το πλεονέκτημα της υβριδικής προσέγγισης είναι ότι συμπεριλαμβάνεται στις εσωτερικές σύνθετες αντιστάσεις, και στις επαγωγικές και χωρητικές-αγώγιμες συνιστώσες σε σειρά η επίδραση της συχνότητας, η οποία κάνει την προσέγγιση αυτή πιο ακριβή από τη συμβατική κυκλωματική προσέγγιση, ειδικά όταν η συχνότητα του ρεύματος σφάλματος είναι υψηλή.

2.3.2.4 Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

Όπως περιγράψαμε στο υποκεφάλαιο 2.3.1 η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης. Ωστόσο, η ανάπτυξη της προσέγγισης αυτής δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αυτή της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης.

Οι R. Verma, D. Mukhedkar [34] και C. Mazetti, G. M. Veca [35] εφήρμοσαν την έννοια της γραμμής μεταφοράς με απώλειες σε οριζόντιο αγωγό γείωσης, με την περιγραφή του οποίου να δίνεται από τις τηλεγραφικές εξισώσεις:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L\frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0$$
(2.3.12)

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + GV = 0$$
(2.3.13)

Σκοπός της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων (2.3.12) και (2.3.13) ήταν η εύρεση της αναλυτικής κατανομής ρεύματος και τάσης κατά μήκος του αγωγού γείωσης στο μιγαδικό επίπεδο και η μετατροπή αργότερα των μιγαδικών εξισώσεων σε εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου με χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace. Αργότερα, οι Μ. Ι. Lorentzou, Ν. D. Hatziargyriou και Β. C. Papadias [36], ξεκίνησαν από τις ίδιες τηλεγραφικές εξισώσεις (2.3.12) και (2.3.13), αλλά παρήγαγαν την εξίσωση κατανομής ρεύματος και τάσης του αγωγού απευθείας στο πεδίο του χρόνου. Το κοινό χαρακτηριστικό των προσεγγίσεων γραμμής μεταφοράς που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ότι οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι ομοιόμορφοι κατά μήκος των αγωγών γείωσης.

Ο λόγος που η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης είναι ότι χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire). Ο οριζόντιος αγωγός γείωσης έχει μεταβατική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αγωγός είναι θαμμένος στο έδαφος ενώ η εναέρια γραμμή μεταφοράς βρίσκεται στον αέρα. Η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης μπορεί να είναι είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας, αλλά είναι εύκολο να συμπεριληφθεί ο ιονισμός του εδάφους στο πεδίο του χρόνου. Παρόμοια με την κυκλωματική προσέγγιση, μπορεί επίσης να εμπεριέχει όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στα διάφορα τμήματα των αγωγών γείωσης. Επιπλέον, η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς μπορεί να προβλέψει τη καθυστέρηση διάδοσης κύματος, η οποία είναι σημαντική όταν το σύστημα γείωσης έχει μεγάλο μέγεθος. Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσέγγιση γραμμής μεταφοράς είναι πολύ μικρότερος συγκριτικά με την προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων που παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαια 2.3.2.1-2.3.2.4 καταγράφονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.1:

Προσεγγίσεις	Μαθηματικές	Οπτική	Διαδικασία	Υπολογιστι-	Ακρίβεια
	εκφράσεις	αναπαράσταση	επίλυσης	κός χρόνος	
Ηλεκτρομαγνη-	Πολύπλοκες	Δύσκολη στην	Πολύπλοκη,	Μεγάλος	Πιστεύε-
τικού Πεδίου		κατανόηση	δύσκολα		ται ότι
			μοντελοποιεί		είναι η πιο
			ιονισμό, μπορεί		ακριβής
			να προβλέψει την		
			καθυστέρηση		
			δίαδοσης κύματος		
Κυκλωματική	Απλές	Εύκολη στην	Απλή, εύκολα	Μικρός	Λογικά
		κατανόηση	μοντελοποιεί		ακριβής
			ιονισμό, δεν		
			μπορεί να		
			προβλέψει την		
			καθυστέρηση		
			διάδοσης κύματος		
Υβριδική	Πολύπλοκες	Όχι πολύ	Ελαφρώς	Μικρός	Λογικά
		εύκολη στην	πολύπλοκη,		ακριβής
		κατανόηση	μπορεί να		
			μοντελοποιήσει		
			ιονισμό,		
			δυνατότητα		
			πρόβλεψης		
			καθυστέρησης		
			διάδοσης κύματος		
			όχι ξεκάθαρη		
Γραμμής	Οι	Πολύ εύκολη	Πολύ απλή,	Μικρός	Λογικά
Μεταφοράς	απλούστερες	στην	μπορεί να		ακριβής
		κατανόηση	προβλέψει		
			καθυστέρηση		
			διάδοσης		
			κύματος, εύκολα		
			μοντελοποιεί		
			ιονισμό		

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των διαφόρων προσεγγίσεων για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης

2.3.2.6 Βελτιωμένες προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς

Ένα μοντέλο για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης πρέπει να είναι απλό για γρήγορες εφαρμογές, και την ίδια στιγμή, να μπορεί να προβλέψει όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Έχοντας ως βάση, λοιπόν, τις συγκρίσεις του Πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς είναι η καλύτερη. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτής της προσέγγισης δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αυτή της κυκλωματικής και της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Μέχρι το 2004, όλες οι προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς ήταν περιορισμένες στη μοντελοποίηση απλών συστημάτων γείωσης, όπως οριζόντιοι αγωγοί γείωσης και απλά ηλεκτρόδια γείωσης. Το 2004, όμως, η Υ. Liu μέσα από την εργασία της [25], μελέτησε τη βελτίωση της προσέγγισης γραμμής μεταφοράς επεκτείνοντας, αρχικά, τη συμβατική προσέγγιση με σταθερές ανά μονάδα μήκους παραμέτρους (L, C, G, r_e) από ένα απλό ηλεκτρόδιο γείωσης σε πλέγματα γείωσης, και παρουσιάζοντας μία προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς, ώστε να υπερκεραστούν τα μειονεκτήματα της συμβατικής προσέγγισης ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς.

2.3.2.6.1 Μειονεκτήματα της προσέγγισης ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς

Οι εξισώσεις του πρώτου μοντέλου γραμμής μεταφοράς του Sunde, το οποίο παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.1, των εξαρτώμενων από τη συχνότητα ανά μονάδα μήκους διαμήκους σύνθετης αντίστασης Z και εγκάρσιας αγωγιμότητας Y, για έναν απλό οριζόντιο αγωγό γείωσης με άπειρο μήκος πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, είναι αντίστοιχα [22]:

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}}$$
(2.3.14)

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\varepsilon_{soil})}\log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right)\right]^{-1}$$
(2.3.15)

όπου $\gamma^2 = i\omega\mu_0 (\sigma_{soil} + i\omega\varepsilon_{soil}), Z_s$ είναι η ανά μονάδα μήκους εσωτερική σύνθετη αντίσταση, Y_i είναι η ανά μονάδα μήκους αγωγιμότητα της μόνωσης του αγωγού, η οποία είναι 0 όταν ο αγωγός είναι σε τέλεια επαφή με το χώμα, *a* είναι η ακτίνα του αγωγού γείωσης και Γ η σταθερά διάδοσης. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για έναν θαμμένο αγωγό γείωσης με απλή αλλαγή της ακτίνας του αγωγού από a σε $\sqrt{2ad}$, όπου d το βάθος στο οποίο είναι θαμμένος ο αγωγός. Δεν είναι, όμως, βέβαιο αν μια τέτοια επέκταση είναι βάσιμη. Επιπλέον, είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν οι αμοιβαίες διαμήκεις σύνθετες αντιστάσεις και εγκάρσιες αγωγιμότητες, που αντιστοιχούν στις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στους αγωγούς γείωσης. Επιπλέον, για τη μέγιστη μεταβατική τάση, υπήρχε μια διαφορά περίπου 13%-40% μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραμάτων [25]. Αυτό σημαίνει ότι η βασισμένη στο μοντέλο του Sunde προσέγγιση γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες από τη συχνότητα παραμέτρους είναι δύσκολο να υιοθετηθεί για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης.

Από εδώ και μέχρι το τέλος του Κεφαλαίου 2, όταν θα αναφερόμαστε σε ανά μονάδα μήκους παραμέτρους αγωγών γείωσης θα υποθέτουμε ότι είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.

Στην εργασία των C. Mazetti και G. M. Veca [35], οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι (G, C και L) υπολογίστηκαν με χρήση των εξισώσεων Sunde (2.3.14)-(2.3.15) για αγωγό μήκους 1m όπως φαίνεται στις εξισώσεις (2.3.16)-(2.3.18):

$$G = \frac{\pi}{\rho_{soil} \left[\ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1 \right]}$$
(2.3.16)

$$C = \frac{\pi \varepsilon_{soil}}{\ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1}$$
(2.3.17)

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1 \right]$$
(2.3.18)

όπου *a* είναι η ακτίνα του αγωγού και *d* το βάθος στο οποίο είναι θαμμένος ο αγωγός. Με χρήση αυτών των παραμέτρων, η ανάλυση μεταβατικών φαινομένων των αγωγών γείωσης με διαφορετικό μήκος πραγματοποιήθηκε στο πεδίο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι θεωρήθηκε πως οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι ανεξάρτητες του μήκους. Ή μπορεί κάποιος να πει ότι σε αυτήν την προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή της άπειρης γραμμής μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος των ηλεκτροδίων γείωσης, αλλά από έρευνες [25] βρέθηκε ότι η μέθοδος αυτή δίνει λάθος μεταβατικές τάσεις στο σημείο εγχύσεων των αγωγών. Αφ' ετέρου, έχει γίνει αντίληπτό ότι οι αγωγοί γείωσης

πεπερασμένου μήκους εκτεθειμένοι σε κρουστικούς παλμούς δεν έχουν μια δομή πεδίου που να είναι πραγματικά εγκάρσια ηλεκτρικά και μαγνητικά (TEM) ή εν μέρει TEM, επομένως οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι (G, C και L) θα πρέπει να περιλαμβάνουν την επίδραση του μήκους του αγωγού.

Βασιζόμενοι στο παραπάνω γεγονός, μερικοί συγγραφείς [34, 36-37] υπολόγισαν την αγωγιμότητα, τη χωρητικότητα και την αυτεπαγωγή πεπερασμένου μήκους αγωγού χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Sunde (2.3.14)-(2.3.15) και κατένειμαν τις παραμέτρους εξ' ίσου σε μια ανά μονάδα μήκους βάση:

$$G = \frac{\pi}{\rho_{soil} \left[\ln \frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1 \right]}$$
(2.3.19)

$$C = \frac{\pi \varepsilon_{soil}}{\ln \frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1}$$
(2.3.20)

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\ln \frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1 \right]$$
 (2.3.21)

όπου l_c είναι το μήκος του αγωγού. Όλες οι άλλες παράμετροι είναι ίδιες όπως και στις εξισώσεις (2.3.16)-(2.3.18). Χρησιμοποιώντας τις κατανεμημένες αυτές παραμέτρους, η μεταβατική ανάλυση υλοποιήθηκε λύνοντας τις τηλεγραφικές εξισώσεις. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος τον αγωγών γείωσης.

2.3.2.6.2 Προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς

Λόγω του ότι η προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς αποτελεί το πιο σύγχρονο και πλήρες μοντέλο προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, κρίνεται σκόπιμη η εκτενέστερη, σε σχέση με τις υπόλοιπες προσεγγίσεις, περιγραφή του.

Η επίδειξη της προσέγγισης μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς [25, 38] για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης ξεκινά από έναν απλό οριζόντιο αγωγό γείωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση ενός απλού αγωγού, η διαίρεσή του σε τμήματα και η σύζευζη αυτών

Ο αγωγός θεωρείται ως ένα λεπτό σύρμα και διαιρείται σε *n* μικρά τμήματα με σκοπό να υπολογίσουμε τις μήτρες των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων (αντιστάσεις γης, δεκτικότητες, αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές):

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}$$
 kore
$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix}$$

Το μήκος του τμήματος θα πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των τμημάτων να λαμβάνεται υπόψη αποτελεσματικά. Αυτό σημαίνει ότι κάποιος δεν μπορεί να διαλέξει τμήματα μεγάλου μήκους για τις προσομοιώσεις καθώς αυτή η κατάσταση θα αντιστοιχούσε στην προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με ανά μονάδα μήκους παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος του ηλεκτροδίου (βλέπε παράγραφο 2.3.2.6.1). Για να το ξεπεράσουμε αυτό, στο παρόν μοντέλο, το μήκος των τμημάτων θα πρέπει να είναι επαρκώς μικρό (<<1/10 του μήκους κύματος στο έδαφος σε αντιστοιχία με την υψηλότερης συχνότητας συνιστώσα της πηγής ρεύματος) έτσι ώστε κάθε τμήμα κατά τη διάρκεια διάδοσης κυμάτων να συνεισφέρει στα φαινόμενα σύζευξης. Συνεπώς, ο αριθμός των τμημάτων *n* θα πρέπει να είναι μεγάλος, αλλά ταυτόχρονα, το μήκος κάθε τμήματος *l_{seg}* θα πρέπει να ικανοποιεί την υπόθεση λεπτών καλωδίων, η οποία είναι *l_{seg}* >> α (α είναι η ακτίνα του αγωγού γείωσης).

Η ανά μονάδα μήκους αντίσταση σε σειρά, που είναι ίδια για όλα τα τμήματα, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.3.22):

$$r_e = \frac{\rho_e}{2\pi\alpha^2} \tag{2.3.22}$$

όπου α είναι η ακτίνα και ρ_e η ειδική αντίσταση του αγωγού. Οι άλλες ανά μονάδα μήκους παράμετροι, όπως αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές, αντιστάσεις γης και δεκτικότητες, μπορούν να υπολογιστούν βάσει της θεωρίας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [22]. Αυτές οι παράμετροι είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του εδάφους και της γεωμετρίας του συστήματος. Η μέθοδος των ειδώλων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων που αφορούν την αντίσταση γης και τη δεκτικότητα, λόγω του ότι το έδαφος θεωρείται πως είναι ημι-άπειρο μέσο και επειδή έχει διαφορετική αγωγιμότητα και επιτρεπτότητα συγκρινόμενο με τον αέρα. Για την επαγωγική αντίσταση, το είδωλο δεν υπάρχει, επειδή αέρας και έδαφος θεωρούνται μη μαγνητικά υλικά με την ίδια μαγνητική διαπερατότητα μ_0 .

Τα στοιχεία της μήτρας αντιστάσεων γης μπορούν να υπολογιστούν με την εξίσωση (2.3.23):

$$R_{ji} = \frac{v_{ji}}{I_{\perp i}} = \frac{\rho_{soil}}{4\pi d_j} \iint_{l_j l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl + k_{sigma} \cdot \frac{\rho_{soil}}{4\pi d_j} \iint_{l_j l_i} \frac{1}{r'_{ji'}} dl dl$$
(2.3.23)

όπου $I_{\perp i}$ είναι η ομοιόμορφη διασπορά πυκνότητας ρεύματος που ρέει από τον άξονα του τμήματος *i* στο έδαφος, $k_{sigma} = (\sigma_{soil} - \sigma_{air})/(\sigma_{soil} + \sigma_{air})$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης λόγω των διαφορετικών αγωγιμοτήτων του αέρα και του εδάφους, v_{ji} είναι η μέση επαγόμενη τάση ανά μέτρο στην επιφάνεια του τμήματος *i*, λόγω της διασποράς ρεύματος από το τμήμα *j*, ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, l_i , l_j και $l_{i'}$ είναι τα μήκη των τμημάτων *i*, *j* και του ειδώλου *i'* αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Όταν *i* = *j*, είναι η ίδια η αντίσταση γης του τμήματος *i*, ενώ όταν *i* ≠ *j* είναι η αμοιβαία αντίσταση γης μεταξύ των τμημάτων *i* και *j*.

Ομοίως, τα στοιχεία της μήτρας δεκτικοτήτων μπορούν να υπολογιστούν με την εξίσωση (2.3.24):

$$P_{ji} = \frac{v_{ji}}{q_i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_{soil}l_j} \iint_{l_j l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl + k_{epsilon} \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon_{soil}l_j} \iint_{l_j l_i'} \frac{1}{r'_{ji'}} dl dl \qquad (2.3.24)$$

όπου q_i είναι η ομοιόμορφη πυκνότητα φορτίου στον άξονα του τμήματος i, $k_{epsilon} = (\varepsilon_{soil} - \varepsilon_{air})/(\varepsilon_{soil} + \varepsilon_{air})$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης λόγω των διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών (επιτρεπτοτήτων) του αέρα και του εδάφους, v_{ji} είναι η μέση επαγόμενη τάση ανά μέτρο στην επιφάνεια του τμήματος i, λόγω της διασποράς ρεύματος από το τμήμα j, ε_{soil} είναι η επιτρεπτότητα του εδάφους, l_i , l_j και $l_{i'}$ είναι τα μήκη των τμημάτων i, j και του ειδώλου i' αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Όταν i = j, είναι η δεκτικότητα του ίδιου του τμήματος i, ενώ όταν $i \neq j$ είναι η αμοιβαία δεκτικότητα μεταξύ των τμημάτων i και j.

Τα στοιχεία της μήτρας αυτεπαγωγών και αλληλεπαγωγών μπορούν να υπολογιστούν θεωρώντας ότι το ρεύμα i_i κατά μήκος του άξονα του τμήματος i είναι ομοιόμορφο. Έτσι, η αυτεπαγωγή L_{ii} του τμήματος i και η αμοιβαία επαγωγή L_{ji} μεταξύ των τμημάτων i και j, δίνονται από τις εξισώσεις (2.3.25α) και (2.3.25β) αντίστοιχα:

$$L_{ii} = \frac{v_{ii}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_i} \int_{l_i} \int_{l_i} \frac{1}{r_{ii}'} dl dl \qquad (2.3.25\alpha)$$

$$L_{ji} = \frac{v_{ji}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_j} \iint_{l_j l_i} \frac{1}{r'_{ji}} \vec{dl} \times \vec{dl}$$
(2.3.25β)

όπου v_{ii} και v_{ji} είναι η μέση πτώση τάσης ανά μέτρο κατά μήκος της επιφάνειας του τμήματος *i* και *j* αντίστοιχα λόγω του διαμήκους ρεύματος i_i , μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους, l_i και l_j είναι τα μήκη των τμημάτων *i* και *j* αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Αν τα τμήματα *i* και *j* είναι κάθετα μεταξύ τους, η αμοιβαία επαγωγή είναι μηδέν.

Αφού γνωρίζουμε τις ηλεκτρικές παραμέτρους του αγωγού και την πηγή ρεύματος έγχυσης που αντιστοιχεί σε κρουστικό παλμό, η μεταβατική συμπεριφορά του

αγωγού γείωσης μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τις τροποποιημένες τηλεγραφικές εξισώσεις (2.3.26) και (2.3.27):

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = r_e I(x,t) + l(x,t) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t}$$
(2.3.26)

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = g(x,t)V(x,t) + c(x,t)\frac{\partial V(x,t)}{\partial t}$$
(2.3.27)

όπου V(x,t) και I(x,t) είναι η άγνωστη κατανεμημένη τάση και το άγνωστο κατανεμημένο ρεύμα αντίστοιχα κατά μήκος του αγωγού γείωσης, r_e είναι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση σε σειρά, l(x,t), g(x,t) και c(x,t) είναι η αποτελεσματική ανά μονάδα μήκους επαγωγική αντίσταση, αγωγιμότητα και χωρητικότητα του αγωγού αντίστοιχα, στη θέση x και για χρόνο t. Οι τηλεγραφικές εξισώσεις (2.3.26) και (2.3.27) λύνονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Finite Difference Time Domain (FDTD) [39], ενώ το πιο σημαντικό στάδιο κατά την επίλυσή τους είναι να εκτιμήσουμε τις αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παραμέτρους l(x,t), g(x,t) και c(x,t) σε κάθε χρονικό βήμα για κάθε τμήμα. Κατά την επίλυση των τηλεγραφικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FDTD, το dxείναι ίσο με το μήκος του κάθε τμήματος l_{seg} . Όταν το μήκος κύματος καθοριστεί, το χρονικό βήμα dt θα πρέπει να επιλεγεί για την προσομοίωση, έτσι ώστε το dx/dtνα είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη ταχύτητα διάδοσης κύματος στο έδαφος $-\frac{v_{atr}}{\sqrt{\varepsilon_{r_soil}}}$, ώστε να εξασφαλίσουμε σταθερά και συνεπή αποτελέσματα. Εδώ, v_{atr}

είναι η ταχύτητα του φωτός στον αέρα.

Πριν περιγράψουμε τη μεθοδολογία υπολογισμού των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων του τμήματος i, l(x,t), g(x,t) και c(x,t), για κάθε χρονικό βήμα, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε πώς δουλεύει η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με ανά μονάδα μήκους παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος ηλεκτροδίου.

Η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς (βλέπε παράγραφο 2.3.2.6.1) εμπεριείχε την επιρροή του μήκους του αγωγού γείωσης στις ανά μονάδα μήκους παραμέτρους υπολογίζοντας τη συνολική αγωγιμότητα, επαγωγική αντίσταση και χωρητικότητα του πεπερασμένου μήκους καλωδίου και μοιράζοντας τις παραμέτρους

εξίσου πάνω σε μια ανά μονάδα μήκους βάση. Οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι δίνονται από τις εξισώσεις (2.3.19)-(2.3.21). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις C και L στις (2.3.20) και (2.3.21) αντίστοιχα είναι εσφαλμένες, γιατί οι εξισώσεις (2.3.19)-(2.3.21) ισχύουν μόνο για ομογενές μέσο. Εφόσον έχουμε έδαφος μισού χώρου, όπως υποθέσαμε παραπάνω, οι συντελεστές ανάκλασης λόγω της διεπιφάνειας αέρα-εδάφους για τον υπολογισμό των G, C και L είναι διαφορετικοί, έτσι, οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι του αγωγού θα πρέπει να υπολογιστούν όπως φαίνεται παρακάτω χρησιμοποιώντας τις (2.3.28)-(2.3.30):

$$G = \frac{2\pi}{\rho_{soil} \left[\left(\ln \frac{2l_c}{a} - 1 \right) + \frac{\sigma_{soil} - \sigma_{air}}{\sigma_{soil} + \sigma_{air}} \cdot \left(\ln \frac{2l_c}{2d} - 1 \right) \right]}$$
(2.3.28)

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_{soil}}{\left(\ln\frac{2l_c}{a} - 1\right) + \frac{\varepsilon_{soil} - \varepsilon_{air}}{\varepsilon_{soil} + \varepsilon_{air}} \cdot \left(\ln\frac{2l_c}{2d} - 1\right)}$$
(2.3.29)

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{2l_c}{a} - 1 \right]$$
 (2.3.30)

Η μεταβατική ανάλυση με την προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τις τηλεγραφικές εξισώσεις (2.3.26)-(2.3.27), με τις ανά μονάδα μήκους παραμέτρους, r_e , C, G και L να είναι σταθερές κατά μήκος του αγωγού σύμφωνα με τις (2.3.28)-(2.3.30). Αλλά για τους αγωγούς με διαφορετικό μήκος, οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι διαφέρουν. Σε αυτήν την προσέγγιση, είναι φανερό ότι, για όλη τη διάρκεια του παλμού ρεύματος, υπάρχει πλήρης αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των διάφορων τμημάτων του αγωγού που οφείλεται στις ανά μονάδα μήκους εξαρτώμενες από το μήκος.

Κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου, το οδεύον κύμα διαδίδεται από το πρώτο τμήμα στο τελευταίο τμήμα με συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δυο τμημάτων μπορεί να υπάρξει αν και μόνο αν τα δυο τμήματα είναι τροφοδοτημένα (αυτό είναι όταν μεταφέρουν ρεύμα ή φορτίο) και επιπρόσθετα η τιμή των συντελεστών σύζευξης θα πρέπει να είναι εξαρτώμενοι από πηγή. Έτσι, στην προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος ηλεκτροδίου, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων έχει υπερεκτιμηθεί κατά τη διάρκεια της μεταβατικής ανάλυσης. Οι συνέπειες αυτής της υπερεκτιμημένης αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των τμημάτων είναι η μεταβατική τάση στο σημείο εισόδου για μακρύτερο αγωγό (π.χ. 280m) να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή κοντύτερου αγωγού (π.χ. 20m) [38], το οποίο είναι λάθος από την οπτική γωνία του συστήματος γείωσης. Αυτό σημαίνει, για δεδομένες παραμέτρους εδάφους, διατομή αγωγού, και παλμό ρεύματος έγχυσης, ο αγωγός με το μεγαλύτερο μήκος θα πρέπει να έχει μεταβατική τάση στο σημείο εισόδου η οποία είναι ίση ή μικρότερη από αυτή του αγωγού με το μικρότερο μήκος.

Σύμφωνα με την προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς βρήκαμε ότι:

- αν η επιρροή του μήκους θα πρέπει να περιλαμβάνεται στον υπολογισμό των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων, μόνο για ομοιόμορφη κατανομή πηγής, οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ οποιοδήποτε δυο τμημάτων θα είναι μονάδα.
- κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων δε θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη από συντελεστές σύζευξης, επειδή κατά τη διάρκεια του παλμού η κατανομή πηγής κατά μήκος του αγωγού δε θα είναι ποτέ ομοιόμορφη.

Συνεπώς, στη μεταβατική ανάλυση του συστήματος γείωσης, οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ οποιοδήποτε δυο τμημάτων θα πρέπει να ποικίλουν με το χρόνο για τους αποτελεσματικούς υπολογισμούς των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων. Έτσι, στο παρόν μοντέλο, οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι l(x,t), g(x,t) και c(x,t) στις τηλεγραφικές εξισώσεις (2.3.26) και (2.3.27) είναι συναρτήσεις του χώρου και του χρόνου.

Ο υπολογισμός των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων βασίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές της μεταβατικής περιόδου.

Η πρώτη περιοχή είναι η περιοχή μηδενικής σύζευξης, η οποία εφαρμόζεται για t=0. Όσο ο παλμός ρεύματος έγχυσης δεν είναι συνδεδεμένος στον αγωγό γείωσης, τα τμήματα του αγωγού είναι ανεξάρτητα, το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι συζευγμένα μεταξύ τους. Η κατάσταση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί όπως αν τα τμήματα του αγωγού βρίσκονται στον αέρα. Υπό την παραπάνω συνθήκη, για κάθε τμήμα *i*, με i = 1,..., n οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι $g_i(t = 0) = 1/R_{ii}$, $c_i(t = 0) = 1/P_{ii}$ και $l_i(t = 0) = L_{ii}$. Εδώ, R_{ii} , P_{ii} και L_{ii} είναι οι διαγώνιες τιμές των παραμετρικών μητρών [R], [P] και [L] αντίστοιχα.

Η δεύτερη περιοχή αντιστοιχεί σε κάθε χρόνο t>0, αφού ο παλμός ρεύματος εγχυθεί στον αγωγό γείωσης, και λέγεται μεταβατική περιοχή σύζευξης. Σε αυτή την περιοχή,

η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων αρχίζει να συνεισφέρει στον υπολογισμό των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων, βασιζόμενοι στην κατανομή πηγής κατά μήκος του αγωγού. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ένα τμήμα παραμένει ελεύθερο (αιωρούμενο) μέχρι να τροφοδοτηθεί από τον οδεύοντα παλμό. Και δεν θα υπάρχει καμία αμοιβαία σύζευξη μεταξύ ενός ελεύθερου τμήματος και ενός τροφοδοτημένου τμήματος. Η συνέπεια του να λάβουμε υπόψη τη χρονικά μεταβλητή αμοιβαία σύζευξη είναι να μειώσουμε τα αποτελεσματικά *c* και *g*, και ταυτόχρονα να αυξήσουμε το αποτελεσματικό *l* για ένα δεδομένο τμήμα. Ανάλογα με το είδος του παλμού ρεύματος, η μείωση των *c* και *g* και η αύξηση του *l* θα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τμήμα να μπορεί να έχει τιμές αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων οι οποίες είναι το πολύ, αντιστοιχώντας σε μια κατάσταση μέγιστης σύζευξης, ομοιόμορφη κατανομή πηγής. Βασιζόμενοι σε αυτή τη γνώση, είναι προφανές ότι οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ των τμημάτων για τον υπολογισμό των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων μπορούν να ποικίλουν ανάμεσα στο μηδέν και το ένα.

Η τρίτη περιοχή είναι η περίπτωση όπου η αμοιβαία σύζευξη φτάνει ένα μέγιστο και οι συντελεστές σύζευξης θα είναι σχεδόν μονάδα. Αυτή είναι ιδανική περίπτωση που αντιστοιχεί σε σταθερό ρεύμα DC, που δεν πρόκειται ποτέ να επιτευχθεί για παλμό ρεύματος που αντιστοιχεί σε κεραυνό.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξήγηση, ο απ' ευθείας υπολογισμός των πραγματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων του i-οστού τμήματος $g_i(n\Delta t)$, $c_i(n\Delta t)$ και $l_i(n\Delta t)$ για $t = n\Delta t$ είναι ο ακόλουθος:

Με χρήση των αποτελεσματικών $g_i((n-1)\Delta t)$, $c_i((n-1)\Delta t)$ και $l_i((n-1)\Delta t)$, μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (2.3.26) και (2.3.27) η τάση του i-οστού κόμβου $V(i, n\Delta t)$ και το ρεύμα μέσα από το i-οστό τμήμα $I(i, n\Delta t)$. Η μέση τάση του i-οστού τμήματος για $t = n\Delta t$ θα είναι:

$$V_ave(i, n\Delta t) = 0.5 \cdot \left[V(i, n\Delta t) + V(i+1, n\Delta t)\right]$$
(2.3.31)

Έπειτα, το διαμήκες ρεύμα κατά μήκος του i-οστού τμήματος είναι $I(i, n\Delta t)$, το ρεύμα διασποράς από αυτό το τμήμα και το φορτίο του για t = n Δt μπορούν να υπολογιστούν ως εξής :

$$I_dis(i, n\Delta t) = g_i((n-1)\Delta t) \cdot V_ave(i, n\Delta t)$$
(2.3.32)

$$Q(i, n\Delta t) = c_i((n-1)\Delta t) \cdot V _ ave(i, n\Delta t)$$
(2.3.33)

Γνωρίζοντας τις νέες κατανομές πηγής, οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι του i-οστού τμήματος για $t = n\Delta t$ μπορούν να υπολογιστούν ως εξής :

$$g_i(n\Delta t) = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot \alpha_{ji}\right)}$$
(2.3.34)

$$c_i(n\Delta t) = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot b_{ji}\right)}$$
(2.3.35)

$$l_{i}(n\Delta t) = \sum_{j=1}^{n} L_{ij} \cdot d_{ji}$$
(2.3.36)

όπου α_{ji} , b_{ji} , και d_{ji} είναι συντελεστές σύζευξης προκειμένου να συμπεριληφθεί για το τμήμα *i* η σύζευξη από άλλα τμήματα *j*. Αυτοί οι συντελεστές σύζευξης κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και του ένα ανάλογα με την κατανομή της πηγής κατά μήκος του αγωγού. Όταν οι αναλογίες των πηγών στα τμήματα *j* και *i* είναι μεγαλύτερες από 1, υποθέτουμε ότι οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ τους είναι 1 για να μην παραβιαστούν οι μέγιστες συνθήκες σύζευξης. Αν κάποιος επιλέξει τους συντελεστές σύζευξης ίσους με τις αναλογίες των πηγών στα τμήματα, που είναι μεγαλύτερες από 1, οι προκύπτουσες αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι θα είναι μικρότερες για τα *c* και *g* και μεγαλύτερες για το *l* έναντι των αντίστοιχων τιμών που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας ομοιόμορφες κατανομές πηγής.

Όταν υπολογιστούν οι νέες αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι $g_i(n\Delta t)$, $c_i(n\Delta t)$ και $l_i(n\Delta t)$, η τάση στον i-οστό κόμβο $V(i,(n+1)\Delta t)$ και το ρεύμα δια του i-οστού τμήματος $I(i,(n+1)\Delta t)$, μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω και τις κατάλληλες προσομοιώσεις [25, 38], φάνηκε ότι το μοντέλο μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς μπορεί να προβλέψει

τόσο το αποτελεσματικό μήκος οριζόντιου αγωγού γείωσης όσο και τις μεταβατικές τάσεις στον αγωγό επακριβώς. Ωστόσο, η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες ανά μονάδα μήκους παραμέτρους από το μήκος ηλεκτροδίων αποτυγχάνει να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος και τη μεταβατική τάση στο σημείο έγχυσης. Η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες παραμέτρους από το μήκος ηλεκτροδίων είναι βάσιμη μόνο όταν το μήκος του αγωγού γείωσης είναι πολύ μικρότερο από το αποτελεσματικό μήκος και το ρεύμα έγχυσης έχει χαμηλούς χρόνους ανόδου.

Η προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε πολύπλοκα πλέγματα γείωσης με μεγάλο μέγεθος. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα πλέγματα γείωσης με διαφορετικά μεγέθη και τους οριζόντιους αγωγούς γείωσης είναι συγκρίσιμα με αυτά που βασίζονται στις προσεγγίσεις κυκλωματικής θεωρίας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (βλέπε παραγράφους 2.3.2.1 και 2.3.2.2). Επιπροσθέτως, το μοντέλο μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς μπορεί να προσομοιώσει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος, που είναι αδύνατο να προβλεφθεί με το κυκλωματικό μοντέλο, καθώς δεν χρησιμοποιείται διάκριση χώρου στην προσέγγιση κυκλωματικής θεωρίας. Από την άλλη πλευρά, είναι πολύ απλούστερο και χρονικά αποδοτικό από τις προσεγγίσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, επειδή χρειάζεται να λυθούν μόνο οι τηλεγραφικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας τεχνική FDTD και να υπολογισθούν οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι για κάθε τμήμα σε κάθε χρονικό βήμα. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των μητρών των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων [P], [R] και [L] του συστήματος γείωσης είναι επίσης απλές και άμεσες.

Αφού το παρόν μοντέλο είναι στην περιοχή του χρόνου, είναι πιθανό να συμπεριλάβει μελλοντικά ιονισμό εδάφους αυξάνοντας την ακτίνα του αγωγού γείωσης, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού υπερβεί την κρίσιμη τιμή του ιονισμού του εδάφους. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση της ακτίνας του αγωγού γείωσης δεν κάνει τίποτα άλλο παρά να αλλάξει τις ηλεκτρικές παραμέτρους ([L], [C] και [G]) του συστήματος γείωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΡΟ ΟΡΕRΑ-2D

3.1 Γενικά

Δεδομένων των παραμέτρων του εδάφους είναι δυνατό να προσομοιωθούν, με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πακέτων, διάφορα συστήματα γείωσης για διαφορετικές δομές του εδάφους. Το πλεονέκτημα ενός προγράμματος προσομοίωσης έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση σύνθετων/πολύπλοκων συστημάτων γείωσης και να δώσει κάποια αντιπροσωπευτική τιμή του αναπτυσσόμενου επιφανειακού δυναμικού, σε αντίθεση με τις αναλυτικές εξισώσεις, οι οποίες υπόκεινται σε γεωμετρικούς περιορισμούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώνουμε με τη βοήθεια του προγραμματιστικού πακέτου PC OPERA-2D version 13.0 (δισδιάστατα) μοντέλα εδάφους πολυστρωματικής δομής. Συγκεκριμένα, καταπονούμε με σφάλμα διάφορα είδη ετερογενών εδαφών και μελετούμε την κατανομή του δυναμικού στις διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη μεταβατική κατάσταση. Στη συνέχεια γίνεται θεωρητική μελέτη των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Εδώ, αναλύουμε τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος.

3.2 Φιλοσοφία του Προγράμματος

Το OPERA-2D [40] είναι ένα σύνολο προγραμμάτων ανάλυσης δισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα προγράμματα χρησιμοποιούν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να λύσουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (Poisson's, Helmholtz, Diffusion equations), που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεδίων. Επίσης, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μη γραμμικών υλικών. Λόγω της απαίτησης πολλών πληροφοριών πριν γίνει η ανάλυση, πραγματοποιείται η εισαγωγή δεδομένων με τη χρήση ενός ισχυρού αμφίδρομου προ-επεξεργαστή.

Στο πλαίσιο της προ-επεξεργασίας, με τη χρήση της γραφικής αμφίδρομης διαδικασίας, ο μοντελοποιημένος χώρος διαιρείται σε μία συνεχή ομάδα τριγωνικών στοιχείων. Το φυσικό μοντέλο μπορεί να περιγράφει σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες.

Όταν ετοιμαστεί το μοντέλο, η λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο τύπο ανάλυσης (επιλύτη). Υπάρχουν διάφοροι επιλύτες τόσο για μεταβατικά φαινόμενα, φαινόμενα μονίμου καταστάσεως ή στατικά φαινόμενα. Το πρόγραμμα ανάλυσης καθορίζει τη σωστή λύση, περιλαμβάνοντας μη γραμμικά φαινόμενα αν αυτά έχουν μοντελοποιηθεί.

Ο έλεγχος της προσομοίωσης μπορεί να γίνει στη συνέχεια με τον μετ-επεξεργαστή. Ο μετ-επεξεργαστής ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από έναν κατάλογο με γραφικά. Πολλές μεταβλητές του συστήματος είναι διαθέσιμες για έλεγχο, όπως δυναμικά, ρεύματα, πεδία, δυνάμεις και θερμοκρασία. Το πρόσθετο χαρακτηριστικό των μεταβλητών που ορίζονται από το χρήστη επιτρέπει στα αποτελέσματα της επίλυσης να είναι προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα αριθμητικά σφάλματα, λόγω ακατάλληλου πλέγματος, αναλύονται ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Μια πλήρης λύση προβλήματος με το OPERA-2D αποτελείται, λοιπόν, από 3 φάσεις: προετοιμασία δεδομένων ή προ-επεξεργασία, ανάλυση και επίδειξη αποτελεσμάτων ή μετ-επεξεργασία. Επειδή ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής είναι ένα πρόγραμμα, οποιαδήποτε τροποποίηση στα δεδομένα μπορεί να γίνει αμέσως μετά την μετεπεξεργασία. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος, ακολουθεί αρχικά μία συνοπτική παρουσίαση και επεξήγηση των εικονιδίων της γραμμής εργαλείων του προγραμματιστικού πακέτου OPERA-2D.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ εμείς επικοινωνούμε γραφικά με το πρόγραμμα, αυτό καταγράφει τις κινήσεις μας εσωτερικά με τη μορφή κώδικα εντολών (τον οποίο μπορούμε να δούμε στα αρχεία μορφής .log). Ο χρήστης θα μπορούσε, αντί να αλληλεπιδράσει με το πρόγραμμα μέσω των εικονιδίων και του δρομέα του ποντικιού, να γράψει απευθείας τον κώδικα. Παρακάτω γίνεται εκτενής αναφορά και επεξήγηση της λειτουργίας με βάση τη γραφική επικοινωνία με το χρήστη, ενώ αναφερόμαστε στοιχειωδώς όπου χρειάζεται σε εντολές κώδικα.

3.2.1 Γραμμή εργαλείων

Τα διάφορα εικονίδια της γραμμής εργαλείων του προγράμματος φαίνονται συνολικά στο Σχήμα 3.1, ενώ η λειτουργία τους εξηγείται στα σχήματα που ακολουθούν:



Σχήμα 3.1 Η γραμμή εργαλείων του προγράμματος OPERA-2D



1: Open → Άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου.

2: Read Another Case → Αφορά και την «Transient Analysis» κατά τη μετεπεξεργασία. Μας επιτρέπει να επεξεργαστούμε τη λύση του προβλήματος σε κάποια από τις περιπτώσεις του αρχείου αποτελεσμάτων.

3: Save \rightarrow Αποθήκευση του αρχείου με το οποίο εργαζόμαστε.

4: Copy to Clipboard → Αποθήκευση της τρέχουσας εικόνας (μοντέλου) στο
 «πρόχειρο» του υπολογιστή.

5: Print \rightarrow Εκτύπωση της τρέχουσας εικόνας (μοντέλου).

6: Graph Data In Text File → Παρουσίαση της γραφικής παράστασης δεδομένων που εισάγονται μέσω ενός .txt αρχείου.

 Generate Mesh → Δημιουργία όλων των κόμβων και στοιχείων (πλέγμα) που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

8: Set View \rightarrow Καθορισμός των παραμέτρων επίδειξης της γεωμετρίας.

9: Refresh → Ανανέωση επίδειξης της γεωμετρίας.

10: Display Mesh → Καθορισμός επίδειξης ή όχι του πλέγματος.

11: Fixed 1:1 Aspect Ratio \rightarrow Χρησιμοποίηση λόγου διαστάσεων 1:1 για τις επιλογές (επίδειξης) που θα ακολουθήσουν.

12: Zoom Bounding Box → Καθορισμός των συντεταγμένων ορίων της επίδειξης ώστε να περιλαμβάνει όλες τις επιλεγμένες περιοχές.

I3: Zoom In (Rubber Box) → Προσέγγιση μίας περιοχής της εικόνας (μοντέλου), η οποία επιλέγεται μεσω ενός κουτιού μεταβλητών διαστάσεων.

14: Previous Size → Ανανέωση επίδειξης της εικόνας (μοντέλου) στις προηγούμενες
 διαστάσεις.

15: Zoom In (*2) → Προσέγγιση της εικόνας (μοντέλου) κατά ένα παράγοντα 2
 γύρω από το κέντρο.

16: Zoom Out (*2)→ Απομάκρυνση της εικόνας (μοντέλου) κατά ένα παράγοντα 2
 γύρω από το κέντρο.

Recentre at Cursor → Επιστροφή στις προκαθορισμένες (μέσω προγράμματος)
 διαστάσεις επίδειξης.



 Change Colours → Αλλαγή των χρωμάτων (των διαφόρων περιοχών) που χρησιμοποιούνται για την επίδειξη.

 User Variable Calculator → Καθορισμός και συγκαταρίθμηση των διαφόρων αριθμητικών μεταβλητών.

20: Set Units \rightarrow Καθορισμός μονάδων.

21: List Region Data → Συγκαταρίθμηση όλων των συντεταγμένων, ιδιοτήτων, οριακών συνθηκών, τοπικών συστημάτων συντεταγμένων και αντιγράφων των διαφόρων περιοχών του μοντέλου.

 Region Properties → Προκαθορισμός των ιδιοτήτων της επόμενης περιοχής που θα κατασκευαστεί.

 23: Side Properties → Καθορισμός των ιδιοτήτων των πλευρών για τα επόμενα πολύγωνα.

24: Create New Corner at Cursor (or Grid Point) \rightarrow Χρησιμοποίηση του δρομέα του ποντικιού για δημιουργία γωνίας (άκρης) πολυγώνου. Το σημείο που θελουμε τη γωνία του πολυγώνου μπορεί να επιλεγεί γρήγορα και εύκολα αν έχουμε προκαθορίσει ένα πλέγμα σημείων (Cursor Grid – εικονίδιο 34).

25: Pick an Existing Corner \rightarrow Επιλογή μιας ήδη υπάρχουσας άκρης (μέσω δρομέα).

26: Pick on Nearest Construction Line \rightarrow Επιλογή της πλησιέστερης δομικής γραμμής (μέσω δρομέα).

27: Pick at Nearest Construction Junction \rightarrow Επιλογή της πλησιέστερης διασταύρωσης δομικών γραμμών (μέσω δρομέα).

28: Enter corner coordinates → Εισαγωγή (με πληκτρολόγηση) των συντεταγμένων πολυγωνικών άκρων.

29: Erase Last Side → Διαγραφή της τελευταίας πλευράς που χαράχθηκε κατά τη διαδικασία κατασκευής πολυγώνου.

30: Close Polygon \rightarrow Ένωση της αρχικής με την τελευταία επιλεγείσα άκρη για το κλείσιμο του πολυγώνου.

31: Draw Straight Sides → Καθορισμός των επακόλουθων πλευρών να είναι ίσες.

32: Curved Sides with Mid-side Points \rightarrow Καθορισμός των επακόλουθων πλευρών να είναι κυκλικά τόξα, ορισμένα με τη βοήθεια ενδιάμεσων σημείων.

33: Curved Sides Around a Centre → Καθορισμός των επακόλουθων πλευρών να είναι κυκλικά τόξα γύρω από κάποιο κέντρο.

34: Cursor Grid \rightarrow Καθορισμός ενός πλέγματος σημείων.

35: Construction Lines \rightarrow Καθορισμός δομικών γραμμών.

36-38: Γρήγορη σχεδίαση διαφόρων τύπων πολυγώνων (ορθογώνιο, τραπέζιο, κυκλικός τομέας).

39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 Σχήμα 3.1.γ

39: Modify Corner by Picking → Χρησιμοποίηση του δρομέα για αναγνώριση άκρων περιοχών ώστε να τις μετακινήσουμε.

40: Modify Side by Picking → Χρησιμοποίηση του δρομέα για αναγνώριση μιας πλευράς περιοχής ώστε να δούμε και να αλλάξουμε τυχόν κάποιες από τις ιδιότητές της. 41: Modify Region by Picking \rightarrow Χρησιμοποίηση του δρομέα για αναγνώριση μιας περιοχής ώστε να δούμε και να αλλάξουμε τυχόν κάποιες από τις ιδιότητές της.

 42: Split Side into Two → Πρόσθεση μιας καινούριας άκρης σε μία πλευρά κάποιας περιοχής.

43: Set Boundary Conditions by Picking \rightarrow Χρησιμοποίηση του δρομέα για αναγνώριση πλευρών περιοχών ώστε να τους ορίσουμε καινούριες οριακές συνθήκες.

44: Region Groups → Δημιουργία ή επεξεργασία των ιδιοτήτων μελών που ανήκουν στις διάφορες ομάδες περιοχών.

45: Make Copies of Regions → Αντιγραφή περιοχών με αντικατάσταση, περιστροφή ή ανάκλαση.

46: Move Regions → Μετακίνηση περιοχών με αντικατάσταση, περιστροφή ή ανάκλαση.

47: Erase Regions → Απομάκρυνση (διαγραφή) περιοχών από το μοντέλο.

48: Undo \rightarrow Αναίρεση της τελευταίας εντολής EDIT, ERASE, MODIFY ή MOVE.

49: BH Data → Καθορισμός και επεξεργασία των μαγνητικών ιδιοτήτων
 (χαρακτηριστική BH) μη γραμμικών υλικών.

50: Space Charge Emitters → Καθορισμός και επεξεργασία χωρικής φόρτισης.

51: List External Circuits → Καθορισμός και επεξεργασία εξωτερικών κυκλωμάτων.



52: Fields at a Point \rightarrow Υπολογισμός πεδίων σε ένα σημείο.

53: Fields Along a Line → Υπολογισμός και γραφική παράσταση των πεδίων κατά μήκος μίας γραμμής.

54: Fields Around a Circular Arc → Υπολογισμός και γραφική παράσταση των πεδίων κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου.

55: Contour Map \rightarrow Γραφική απεικόνιση των πεδιακών τιμών μέσω ισοϋψών καμπυλών. Η απεικόνιση αυτή γίνεται είτε ως χρωματισμένες περιοχές (Coloured zones) είτε ως γραμμές ενός (Single colour lines) ή πολλαπλών χρωμάτων (Multi-colour lines) είτε ως σύμβολα (Symbols) (Σχήμα 3.6).

56: Vector Map → Γραφική απεικόνιση των πεδιακών τιμών μέσω ενός χάρτη διανυσμάτων.

57: Field Integrals Along a Line → Ολοκλήρωση των πεδιακών τιμών κατά μήκος κάποιας γραμμής.

58: Field Integrals Along a Circular Arc → Ολοκλήρωση των πεδιακών τιμών κατά μήκος κάποιου κυκλικού τόξου.

59: Field Integrals Over Regions → Ολοκλήρωση των πεδιακών τιμών πάνω σε περιοχές.

60: Torque in Rotating Machine \rightarrow Υπολογισμός της μηχανικής ροπής σε μοντέλο στρεφόμενης μηχανής με διάκενο αέρος.

61: Set Active Slice → Επιλογή του ενεργού κομματιού στρεβλωμένου δρομέα σε ένα μοντέλο στρεφόμενης μηχανής.

62: Commands In \rightarrow Διάβασμα εντολών από αρχείο (.comi).

63: Cancel this operation \rightarrow Aκύρωση της εργασίας που επιτελείται.

3.2.2 Μοντελοποίση

Ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρομαγνητικών συσκευών μπορούν να αναπαρασταθούν από δισδιάστατα μοντέλα. Αυτό προϋποθέτει ότι η διάταξη εμπίπτει σε μια από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- μεγάλο μήκος σε μια διεύθυνση, με ομοιόμορφη εγκάρσια διατομή στο μεγαλύτερο μήκος. Σε τέτοιες διατάξεις, μια λογική προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι για μεγάλο μέρος του μήκους, η κατανομή του πεδίου στη διατομή δεν μεταβάλλεται και ότι δεν υπάρχει συνιστώσα του πεδίου παράλληλα στον διαμήκη άξονα. Στο OPERA-2D, τέτοια μοντέλα έχουν XY συμμετρία.
- συμμετρικό εκ περιστροφής. Δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του πεδίου είναι ίδια για κάθε αξονική τομή. Για να μοντελοποιηθεί μια

τέτοια διάταξη επιλέγεται ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων. Για το σκοπό αυτό ακολουθώ το Model \rightarrow Solution Type και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγω «Axisymmetry (RZ)».

Solution Type	? ×
Field type	
Electric	Magnetic
Geometry	
 XY 	Axisymmetry (RZ)
Use recommended	potential type
Potential type	
Vector potential	r * vector potential
 Scalar potential 	Modified r * A
Element type	
 Linear 	Quadratic
ОК	Cancel

Σχήμα 3.2: Με την επιλογή «Axisymmetry» υποδεικνύεται ένα σύστημα κυλινδρικής συμμετρίας

3.2.3 Προ-επεξεργασία (Pre-processing)

Η γεωμετρία της διάταξης, που θα αναλυθεί με το OPERA-2D, παρουσιάζεται στον προ- και μετ-επεξεργαστή σαν μια ομάδα πολυγωνικών περιοχών στο δισδιάστατο επίπεδο. Οι περιοχές είναι μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα (Polygon) που προσδιορίζουν τα διάφορα υλικά στο πρόβλημα. Μια περιοχή, όμως, μπορεί να είναι μια «δευτέρου πλάνου» περιοχή (Background) η οποία καλύπτει όλο το χώρο του προβλήματος. Όλα αυτά μπορούν να καθοριστούν πριν τη δημιουργία μιας περιοχής μέσω του εικονιδίου 22 ή και μετά με πάτημα του εικονιδίου 41 και επιλογή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3:

Polygon Background Back			
Int matching tolerance Material Properties Local Coordinates and Replications Material label (0, 1, 3-102) Permeability or Permittivity Current or charge density Conductivity Material or phase angle Velocity Conductor number Conductor symmetry	Background	Polygon	
Material Properties Local Coordinates and Replications Material label (0, 1, 3-102) Permeability or Permittivity Current or charge density Conductivity Material or phase angle Velocity Conductor number Conductor symmetry		int matching tolerance	
Material label (0, 1, 3-102) Permeability or Permittivity Current or charge density Conductivity Material or phase angle Velocity Conductor number Conductor symmetry	Coordinates and Replications	Material Properties Local Coordinates and Rep	
Current or charge density Conductivity Material or phase angle Velocity Conductor number Conductor symmetry	Permeability or Permittivity	Material label (0, 1, 3-102)	
Material or phase angle Velocity Conductor number Conductor symmetry	Conductivity	Current or charge density	
Conductor number Conductor symmetry	Velocity	Material or phase angle	
Conductor symmetry		Conductor number	
		Conductor symmetry	
Connected: program calculates total current Disconnected: total current set by density*area	calculates total current Disconnected: total current set by density*area	Connected: program calculates total current	

Σχήμα 3.3: Χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν πολύγωνο (Polygon) ή «δεύτερου πλάνου» (Background) και καθορισμός των ιδιοτήτων της

Μέσα σε κάθε περιοχή, η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτόματη, χρησιμοποιώντας σαν εισαγόμενα δεδομένα τις συντεταγμένες των κορυφών, τις καμπυλότητες και τις υποδιαιρέσεις των πλευρών. Στο Σχήμα 3.4 βλέπει κανείς ότι είναι δυνατή η κατά βούληση μεταβολή του μεγέθους της καμπυλότητας που φέρει μια πλευρά ενός πολυγώνου (curvature), καθώς και των πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος που αντιστοιχούν σε αυτήν (number of elements). Στο ίδιο παράθυρο, που εμφανίζεται με πάτημα του εικονιδίου 40 και επιλογή κάποιας πλευράς, μπορούμε να ρυθμίσουμε και τις οριακές συνθήκες, να δώσουμε δηλαδή στην πλευρά κάποιο δυναμικό (Field is tangential ή Field is normal), είτε να μην τις καθορίσουμε καθόλου (No boundary condition) αφήνοντας έτσι το πρόγραμμα να υπολογίσει το δυναμικό της κατά την ανάλυση. Με το bias καθορίζουμε πώς θα κατανεμηθούν τα πεπερασμένα στοιχεία π.χ. 0.5 σημαίνει ομοιόμορφη κατανομή κατά μήκος της πλευράς, 0.1 πυκνή συγκέντρωση στην αρχή (με βάση το πώς τη χαράξαμε αρχικά) και 0.9 πυκνή συγκέντρωση στο τέλος.

Modify Side Properties
Number of elements 40
Subdivision bias
Set by cursor position
Bias 0.5
Curvature -9000
Vector potential b/c
 Field is tangential (fixed potential)
 Field is normal
Symmetry
No boundary condition
Potential 0
OK Cancel

Σχήμα 3.4: Καθορισμός της καμπυλότητας, του αριθμού και της κατανομής των στοιχείων, καθώς και των οριακών συνθηκών μιας πλευράς

Υπάρχουν δύο κατηγορίες σχημάτων των περιοχών, τα τετράπλευρα και γενικά πολύγωνα. Το πλέγμα μέσα στα τετράπλευρα δημιουργείται από μετασχηματισμό σε μοναδιαίο τετράγωνο και κανονική υποδιαίρεση. Το πλέγμα είναι κατ' αυτόν τον τρόπο προβλεπόμενο και ο χρόνος δημιουργίας του μικρός.

Το πλέγμα μέσα στα πολύγωνα δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στον τριγωνισμό Delaunay. Εσωτερικοί κόμβοι προστίθενται, αν είναι απαραίτητο, για να επιτύχουν μεγέθη στοιχείων που διαφέρουν λίγο εκατέρωθεν των περιοχών και σχήματα στοιχείων που είναι κατά το δυνατό περίπου ισόπλευρα. Τα πολύγωνα επιτρέπουν σε μεγάλες περιοχές χώρου, ειδικά κοντά στα όρια να πλεγματοποιούνται με τον ελάχιστο αριθμό περιοχών.

Το πλέγμα δημιουργείται με την εντολή «Generate mesh» (εικονίδιο 7), οπότε εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 3.5 όπου μπορούμε να ορίσουμε το επιθυμητό διάστημα ανοχής. Ύστερα από τη διαμόρφωσή του πλέγματος κάνει την εμφάνισή του ένα ενημερωτικό παράθυρο που πληροφορεί το χρήστη για το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν σχηματιστεί (number of elements), αλλά και για τον αριθμό των κόμβων (number of nodes) του πλέγματος.

Generate Mesh
Tolerance 5.0E-05
Display working
OK Cancel

Σχήμα 3.5: Η εντολή δημιουργίας πλέγματος

Όλες οι ιδιότητες των υλικών και οι οριακές συνθήκες αποθηκεύονται με την κάθε περιοχή. Εξαίρεση αποτελούν οι μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ πυκνότητας ροής και έντασης πεδίου που αποθηκεύονται ως πίνακες τιμών, οι οποίοι συνδέονται με τις περιοχές με κωδικούς αριθμούς υλικών (εικονίδιο 49).

Πριν αποθηκευτεί ένα αρχείο δεδομένων πρέπει να καθοριστεί το είδος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς επίσης και οι εκάστοτε οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση ανάλυσης της μεταβατικής συμπεριφοράς που αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται η εντολή «Transient Analysis», για τη λειτουργία της οποίας αναφερόμαστε εκτενώς στο υποκεφάλαιο 3.5.

3.2.4 Ανάλυση (Analysis)

Για την παροχή των επιπρόσθετων πληροφοριών που είναι απαραίτητες για κάθε πρόγραμμα ανάλυσης, χρησιμοποιείται η εντολή «Start analysis», η οποία επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει στοιχεία όπως: ανοχή σύγκλισης, σημεία χρονικής εισόδου, μη γραμμικό επαναληπτικό τύπο κλπ. Μετά από αυτό τα προγράμματα ανάλυσης δεν χρειάζονται πρόσθετες πληροφορίες από τον χρήστη. Τα προγράμματα δημιουργούν αρχεία αποτελεσμάτων που περιέχουν ένα αντίγραφο των δεδομένων και της λύσης και ένα αρχείο που περιέχει διαγνωστικά.

3.2.5 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

Ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής OPERA-2D/PP μπορούν να διαβάσουν αρχεία αποτελεσμάτων από τα προγράμματα ανάλυσης, να εμφανίζουν και να επεξεργάζονται λύσεις. Οι λύσεις αποτελούνται από τις κομβικές τιμές του δυναμικού και τις τιμές των στοιχείων για το ρεύμα, την πυκνότητα φορτίου, τη διαπερατότητα ή την επιτρεπτότητα. Οποιαδήποτε απλή πεδιακή ποσότητα (δυναμικό, ένταση πεδίου,

πυκνότητα ροής, πυκνότητα ρεύματος, κλπ) μπορεί να εμφανίζεται σε σημεία, κατά μήκος γραμμών ή με τη μορφή δυναμικών γραμμών ή χρωματικών περιοχών που υπερτίθενται στο σχήμα της διάταξης σαν περιγράμματα στις περιοχές (εικονίδια 52-56, Σχήμα 3.6). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αλγεβρικές εκφράσεις τέτοιων πεδιακών ποσοτήτων.

Πρόσθετη επεξεργασία μπορεί να πάρει την μορφή ολοκληρώσεων κατά μήκος γραμμών ή πάνω σε περιοχές (εικονίδια 57-59) δίνοντας τιμές για δυνάμεις, αποθηκευμένες ενέργειες κλπ, ή υπολογισμό τροχιάς σωματιδίων.

Contour Map	? <mark>×</mark>	
Expression POT		
Style	Single colour line options	
Single colour lines	V Automatic range	
Coloured zones		
Multi-colour lines	Number of contours 10	
Symbols		
No contours	Colour Automatic choice 🗸	
Regions Other Optio	ns	
Regions		
First region or group	1 Vast region *	
Include all material	s Materials to include	
Exclude no materials Material to exclude		
AC time		
angle amplitu		
Draw contours	Cancel Refresh picture and draw contours	

Σχήμα 3.6: Contour Map για τη γραφική απεικόνιση των πεδιακών τιμών

3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα προγράμματα ανάλυσης του PC OPERA υπολογίζουν τα πεδιακά μεγέθη με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η φιλοσοφία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνοπτικά είναι η ακόλουθη: Το στοιχείο κατασκευής μέσα στο οποίο πρέπει να βρεθεί η κατανομή των καταπονήσεων (ή γενικά ενός πεδιακού μεγέθους) αντικαθίσταται με πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων, στα οποία αντιστοιχίζονται ιδιότητες ίδιες με τις αντίστοιχες του κατασκευαστικού στοιχείου. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί γενικά σε οποιοδήποτε πρόβλημα με οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Βασίζεται στην διαίρεση του χώρου στον οποίο ικανοποιείται η εξίσωση σε μικρά στοιχεία όγκου (τα πεπερασμένα στοιχεία). Μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιείται ένα απλό πολυώνυμο που προσεγγίζει την λύση.

Η γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του χώρου.

Θεωρούμε μια εξίσωση Poisson που περιγράφει το δυναμικό σε μια διάσταση:

$$\nabla \varepsilon \nabla \phi = \rho \tag{3.3.1}$$

Η συνάρτηση δυναμικού μπορεί να είναι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό.

Σε αυτή την περίπτωση το ρ θα είναι γραμμική πυκνότητα φορτίου. Για να οριστεί το δυναμικό χρειάζονται οριακές συνθήκες που μπορεί να είναι είτε τιμές του δυναμικού είτε της παραγώγου του για παράδειγμα:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \tag{3.3.2}$$

Για την λύση της εξίσωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε στοιχεία όγκου. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό θα προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi = \alpha + \beta x \tag{3.3.3}$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό θα είναι συνεχές στο χώρο παρόλο που η παράγωγος του μπορεί να είναι ασυνεχής αν και η επιτρεπτότητα ε είναι ασυνεχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μπορεί να δείξει αυτή την συμπεριφορά. Έτσι είναι βολικό η εξίσωση (3.3.3) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για άλλα πολυώνυμα που έχουν κοινό κόμβο.

Μια περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (3.3.3) με όρους κομβικών συναρτήσεων N_i που καθορίζονται ως εξής:

$$N_i(x) = 1 \qquad x = x_i$$

$$N_i(x) = 0 \qquad x = x_j \quad j \neq i$$
(3.3.4)

όπου x_iείναι η x συντεταγμένη του κόμβου i. Η εξίσωση 3.4.3 μπορεί τώρα να πάρει την μορφή:

$$\phi(\mathbf{x}) = N_1(\mathbf{x}) \phi_1 + N_2(\mathbf{x}) \phi_2$$
(3.3.5)

Οι συναρτήσεις N_i εκφράζονται σε όρους τοπικών συντεταγμένων μέσα στο στοιχείο. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων ξ οι συναρτήσεις N_i γράφονται ως εξής:

$$N_{I} = \frac{1}{2} (I - \xi)$$

$$N_{2} = \frac{1}{2} (I + \xi)$$

$$-1 \le \xi \le 1$$
(3.3.6)

Οι συναρτήσεις N_i κάθε κόμβου ορίζονται μόνο εντός των στοιχείων που περιλαμβάνουν αυτόν τον κόμβο και είναι μηδενικές εκτός των στοιχείων αυτών.

Η μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού με χρήση χαρακτηριστικών τιμών δυναμικού των κόμβων και συναρτήσεων N_i αποτελεί τη βάση στην οποία πολλές εναλλακτικές διαδικασίες μπορούν να στηριχθούν για την επίλυση της εξίσωσης (3.3.1)

Μια προσεγγιστική λύση του δυναμικού φ καθορίζεται από την πιο κάτω σχέση:

$$\int_{a}^{b} (\nabla W \varepsilon \nabla \phi + W \rho) dx - [W \varepsilon \frac{9 \phi}{9 \chi}]_{a}^{b}$$
(3.3.7)

όπου W είναι η συνάρτηση βάρους και α, b τα όρια της εξίσωσης.

Η εξίσωση (3.3.7) οδηγεί κατευθείαν σε αριθμητικό υπολογισμό της λύσης χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις N_i που εξηγήθηκαν πιο πάνω.

Ο τομέας από α εώς b διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις

συναρτήσεις βάρους μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση ότι η εξίσωση (3.3.7) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

Η εξίσωση για την συνάρτηση βάρους W_i θα εξαχθεί από την:

$$\sum_{j} \left(\int_{a}^{b} (\nabla N_{i} \varepsilon \nabla N_{j} \phi_{j} + N_{i} \rho) \vartheta x \right) - \left[N_{i} \varepsilon \frac{\vartheta \phi}{\vartheta x} \right]_{a}^{b} = 0$$
(3.3.8)

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i.

Παίρνοντας όλες τις εξισώσεις για τις διαφορετικές συναρτήσεις βάρους θα έχουμε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που σε μητρική μορφή γράφονται ως:

$$K\Phi = S \tag{3.3.9}$$

όπου K ο πίνακας των συντελεστών, Φ το διάνυσμα των άγνωστων τάσεων στους κόμβους και S το διάνυσμα των οριακών συνθηκών ή των πυκνοτήτων φορτίου.

Οι συντελεστές στον πίνακα Κ έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_{a}^{b} \nabla N_i \varepsilon \nabla N_j \, dx \tag{3.3.10}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (3.3.10) γίνεται για όρια από α εώς b μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους i και j συνεισφέρουν.

Οι εξισώσεις στην σχέση (3.3.9) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα ε δεν είναι γραμμική. Για την επίλυση αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Δίνεται μια αρχική τιμή στα δυναμικά $Φ_n$ και υπολογίζεται μια νέα λύση $Φ_{n+1}$ επιλύοντας το γραμμικοποιημένο Ιακοβιανό σύστημα:

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n - J_n^{-1} R_n \tag{3.3.11}$$

Όπου το υπόλοιπο R δίνεται από την:

$$R_n = K_n \Phi_n - S_n \tag{3.3.12}$$

και η Ιακοβιανή J από την:

$$J_n = \frac{9}{9\Phi_n} (K_n \Phi_n - S_n)$$
(3.3.13)

Με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson προσεγγίζεται η ζητούμενη τιμή του δυναμικού.

3.4 Προγράμματα Ανάλυσης

Τα προγράμματα ανάλυσης του προγραμματιστικού πακέτου OPERA-2D περιγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1:

Στατικά				
ST	Γραμμικά ή μη γραμμικά μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά με ισοτροπικά υλικά και μόνιμους μαγνήτες			
SP	Ηλεκτροστατικά, περιλαμβάνοντα τις συνέπειες χωρικών φορτίων από δέσμες σωματιδίων			
Δινορρεύματα				
AC	Μόνιμης κατάστασης εναλλασσόμενα δινορεύματα με γραμμικά ή μη γραμμικά υλικά και εξαρτημένες πηγές ρεύματος ή τάσης. Οι επιτρεπτότητες μπορούν να ληφθούν από τα δεδομένα της περιοχής, από μια προηγούμενη ST ή TR λύση, ή να υπολογιστούν από το πεδίο της AC λύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η επιτρεπτότητα μπορεί να είναι σύνθετη.			
TR	Μεταβατικά δινορρεύματα με γραμμικά ή μη γραμμικά υλικά, συνδεδεμένα σε εξωτερικά κυκλώματα.			
VL	Δινορρεύματα επαγόμενα από κίνηση σταθερής ταχύτητας ενός τμήματος του μοντέλου λαμβάνοντας υπ' όψη και το υπόλοιπο.			
RM	Διαμορφωτής περιστροφικής κίνησης: ένας διαμορφωτής μεταβατικών δινορρευμάτων, επεκτεινόμενος ώστε να περικλείει τις συνέπειες της περιστροφής συμπαγούς σώματος, χρονομεταβλητά ρεύματα και σύνδεση σε εξωτερικά κυκλώματα.			
Ανάλυση καταπόνησης				
--	---	--	--	--
SA	Ανάλυση καταπόνησης, χρησιμοποιώντας σημειακές δυνάμεις σαν εισόδους ή πυκνότητες δύναμης του σώματος υπολογισμένες από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.			
Θερμική ανάλυση				
тн	Θερμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας σημειακές θερμοκρασίες σαν εισόδους και πυκνότητες ισχύος στοιχείων από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.			
THTR	Μεταβατική έκδοση της θερμικής ανάλυσης.			
Πίνακας 3.1: Προγράμματα ανάλυσης του OPERA-2D				

Υπάρχει επίσης ένα ακόμα χρήσιμο πρόγραμμα που μεταφράζει DXF αρχεία σε Opera-2D εκτελέσιμα αρχεία εισαγωγής (.comi).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται εφαρμογή της ανάλυσης μεταβατικής κατάστασης TR.

3.5 Μεταβατική Ανάλυση (Transient Analysis)

Το πρόγραμμα μεταβατικής ανάλυσης (OPERA-2D/TR) επιλύει προβλήματα δινορρευμάτων, όπου τα οδηγούντα ρεύματα ή τάσεις μεταβάλλονται με το χρόνο με προκαθορισμένο τρόπο. Μπορεί να αναλύσει την απόκριση σε πολλές συναρτήσεις εισόδου λαμβάνοντας υπόψη ένα «δευτέρου πλάνου» σταθερό πεδίο, το επιδερμικό φαινόμενο, μη γραμμικά υλικά, τόσο σε XY όσο και σε RZ (κυλινδρική) συμμετρία. Η εντολή για μεταβατική ανάλυση δίνεται ακολουθώντας το Model \rightarrow Analysis Options \rightarrow Transient Analysis και στο παράθυρο που ανοίγει (Σχήμα 3.7) μπορούμε να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους της, για τις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά.

Transient analy	sis			8 X
Restart from ci	urrent solution			
Material type and	iteration paramet	ters		
Linear mat	erial analysis			
Nonlinear r	naterial analysis			
Tolerance in nonli	near analysis 1.0	E-03		
Number of nonlin	ear iterations 1			
Demagnetisatio	on data			
Demagnetisatio	n temperature B/	ASE		
Lossy dielect	ric			
Time stepping	Output times	Drive	Logging	Com 4 🕨
Туре				
Fixed str	p			
Adaptive	e step			
Fixed time step	0.01			
Initial adaptive	time step 0			
Tolerance for a	daptive time step	1.0E-03		
	ОК		Cancel	

Σχήμα 3.7: Η εντολή για μεταβατική ανάλυση

3.5.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται

To OPERA-2D/TR επιλύει τη διανυσματική εξίσωση διάχυσης με το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό ως την άγνωστη μεταβλητή:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{\mathbf{A}} - \vec{\mathbf{H}}_{c}\right) = J_{s} - \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t}$$
(3.5.1)

Στην τελευταία εξίσωση η πυκνότητα ρεύματος έχει διασπαστεί στις καθορισμένες πηγές $\vec{J_s}$ και στα ρεύματα που δημιουργούνται $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$. Σε δύο διαστάσεις, μόνο οι συνιστώσες z των \vec{A} και $\vec{J_s}$ υπάρχουν. Τότε η εξίσωση (3.5.1) απλοποιείται στην:

$$-\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A}_{z} - \left(\nabla \times \overrightarrow{\mathbf{H}_{c}}\right)_{z} = J_{s} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_{z}}{\partial t}$$
(3.5.2)

3.5.2 Συναρτήσεις εισόδου

Το «οδηγόν» πεδίο παρέχεται από πηγές ρεύματος $\overrightarrow{J_s}$, τάσεις, συνοριακές συνθήκες μη μηδενικού δυναμικού και εξαναγκαστικές δυνάμεις μονίμων μαγνητών $\overrightarrow{\mathrm{H_c}}$.Οι

μόνιμοι μαγνήτες (μπορούν να οριστούν με μία μη μηδενική τιμή για το Η όταν B=0 ως ένα πρώτο σημείο της καμπύλης BH) προφανώς δημιουργούν ένα σταθερό πεδίο. Οι άλλοι παράγοντες εισόδου μπορούν να έχουν μία προδιαγραμμένη μορφή στο χρόνο. Κάθε τιμή αριθμού αγωγού (παράμετρος περιοχής) μπορεί να σχετιστεί με μία διαφορετική συνάρτηση εισόδου με, αν είναι απαραίτητο, κάθε περιοχή να έχει μία διαφορετική συνάρτηση.

ONOMA	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ
COSINE	t < 0, F = F(0)
	$t \ge 0, \ F = \cos(2\pi f t + \phi)$
DC	Σταθερή για όλο το χρονικό διάστημα εξέτασης
РЕАК	t < 0, F = 0
	$t \ge 0, \ F = at \exp\left(-t^2 / b\right)$
RAMP	t < 0, F = 0
	$t \ge 0, t \le t_c : F = \frac{t}{t_c}$
	$t \ge t_c, F = 1$
EXPONENTIAL	t < 0, F = 0
	$t \ge 0, \ F = 1 - \exp\left(-t/t_c\right)$
SINE	t < 0, F = F(0)
	$t \ge 0, F = \sin(2\pi f t + \phi)$
STEP	t < 0, F = 0
	$t \ge 0, F = 1$
TTOFF	t < 0, F = F(0)
	$t \ge 0, F = καμπύλες τρίτου βαθμού από δεδομένα$
	πίνακα σε time-table αρχείο (.tt)
	F(0) είναι η τιμή της συνάρτησης στο αρχείο .tt για t=0
TTON	t < 0, F = 0
	$t \ge 0, F = καμπύλες τρίτου βαθμού από δεδομένα$
	πίνακα σε time-table αρχείο (.tt)

Οι συναρτήσεις εισόδου που μπορούμε να εφαρμόσουμε παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

FUNCTIONAL	t < 0, F = F(0)
	$t \ge 0, F = \kappa \alpha \theta$ ορισμένη από το χρήστη συνάρτηση με
	απευθείας πληκτρολόγηση της μορφής της

Πίνακας 3.2: Συναρτήσεις εισόδου μεταβατικής ανάλυσης

Η επιλογή της επιθυμητής συνάρτησης γίνεται πατώντας στο τρίτο από αριστερά tab του παραθύρου «Transient Analysis» (Σχήμα 3.7) με τίτλο «Drive» και ακολούθως «Change». Στο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα 3.8) τσεκάρουμε στη συνάρτηση που θέλουμε να έχουμε ως είσοδο, πατάμε «Apply» και ακολούθως «OK». Ενδεικτικά στο Σχήμα 3.8 έχουμε επιλέξει το TTON να διαβάσει από το time-table αρχείο Book1.tt (Σχήμα 3.9). Αν τσεκάραμε σε κάποια άλλη συνάρτηση, στον κενό χώρο δίπλα θα έπρεπε να πληκτρολογήσουμε την τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου π.χ. το t_c για την εκθετική (exponential).

Set drive data	(), (wee		<u> २</u>
Drive	Function	Drive type	Sine
DEFAULT	C:\Us(Christos K.)\E	🔲 Unset	Frequency Phase
		DC	Cosine
		Step	
		Sine	Prase Phase
		Cosine	Ramp time
		Ramp	Peak time
		Peak	
		Exponential	
		Timetable (switch on)	Switch on timetable pp/Diplomatikh (Christos K.)/Book1.tt
		Timetable (switch off)	Switch off timetable p\Diplomatikh (Christos K.)\Book1.tt 💌 🛄
•	III •	Functional	Function
	ОК	Apply	Close

Σχήμα 3.8: Επιλογή συνάρτησης εισόδου

Μετά την επιλογή της, η συνάρτηση εισόδου χρησιμοποιείται για να διαβαθμίσει το αντίστοιχο «οδηγόν» πεδίο.

Η επιλογή πίνακα χρόνων (time-table-.tt) επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει διαφορετικές συναρτήσεις εισόδου από τις ήδη προγραμματισμένες στον κώδικα ανάλυσης. Οι πίνακες αποτελούνται από αρχεία που περιέχουν ως και 1000 ζεύγη τιμών σε ελεύθερη μορφή, ένα ζεύγος ανά γραμμή:

File	Edit Format View	Help	
0.1	32.9610642		
0.2	58.58308357		
0.3	78.48951923		
0.4	93.94472385		
0.5	105.9333762		=
0.6	115.2223448		-
0.7	122.4088672		
0.8	127.9580726		
0.9	132.2322038		
1	135.5133755		
1.1	138.021299		
1.2	139.9270854		
1.3	141.363996		
1.4	142.430010		
1.5	143.2233091		
1.0	143.7030003		
1.7	144.1033300		
1.0	144.5988335		
2	144 6730634		-
-	144.070004		
Ľ			₹ ad

Σχήμα 3.9: Ενδεικτικό αρχείο πίνακα χρόνων (time-table - .tt)

Ο πρώτος αριθμός σε κάθε γραμμή καθορίζει το χρόνο, ενώ ο δεύτερος δίνει την αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης. Οι χρονικές τιμές πρέπει να ξεκινούν από το 0 και να αυξάνουν καθώς προχωράμε προς τα κάτω. Ασυνέχειες στην τιμή ή την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης μπορούν να δηλωθούν προσδιορίζοντας δύο τιμές για την ίδια τιμή χρόνου. Για την περίπτωση switch-on (TTON), η τιμή της συνάρτησης για χρόνο μηδέν δεν χρειάζεται να είναι μηδέν, αλλά υποθέτεται ότι η συνάρτηση έχει τιμή μηδέν για t<0. Πέρα από την τελευταία τιμή χρόνου στον πίνακα η συνάρτηση τρίτου βαθμού που υπολογίστηκε για το τελευταίο τμήμα του πίνακα.

Οι καθορισμένες από το χρήστη συναρτήσεις του επιτρέπουν να πληκτρολογήσει ο ίδιος τη μορφή της συνάρτησης εμπεριέχοντας τη χρονική μεταβλητή μεταβατικού συστήματος TTIME π.χ. 50*(0.5*TTIME-10). Το TTIME τότε παίζει το ρόλο του χρόνου t (Πίνακας 3.1) για τη νέα συνάρτηση. Η καθορισμένη από το χρήστη συνάρτηση μπορεί να δοθεί ως παράμετρος στον προ- και μετ-επεξεργαστή πριν από το γράψιμο του αρχείου δεδομένων για ανάλυση ή να καθοριστεί στο αρχείο εντολών .comi μέσω της παραμέτρου MOTIONCOMI της υπο-εντολής DATA του SOLVE. Η καθορισμένη μέσω του αρχείου .comi συνάρτηση μπορεί να επιλεγεί σαν είσοδος πατώντας στο τελευταίο tab του παραθύρου «Transient Analysis» (Σχήμα 3.7) με τίτλο «Command File» , αναζητώντας και επιλέγοντας το αντίστοιχο αρχείο .comi και πατώντας ΟΚ.

Transient analysis
Restart from current solution
Material type and iteration parameters
Linear material analysis
Nonlinear material analysis
Tolerance in nonlinear analysis 1.0E-03
Number of nonlinear iterations 1
Demagnetisation data
Demagnetisation temperature BASE
Cossy dielectric
ping Output times Drive Logging Command File
Command file for functionial drives
File name 🔹 🕠
OK Cancel

Σχήμα 3.10: Επιλογή καθορισμένης σε αρχείο εντολών συνάρτησης εισόδου

3.5.3 Δινορρεύματα και αγωγοί εισόδου

Σε μερικά προβλήματα είναι απαραίτητο να επιτρέψουμε στα δινορρεύματα να ρέουν στους αγωγούς εισόδου, ανακατανέμοντας την πυκνότητα ρεύματος, ή να περιορίσουμε το συνολικό δινόρρεμα σε έναν αγωγό στο μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται με επίλυση μίας επιπλέον εξίσωσης για κάθε ομάδα περιοχών που συνθέτουν έναν τέτοιο αγωγό. Αυτή η εξίσωση περιορίζει το συνολικό ρεύμα, I_f που ρέει ως $\frac{\partial A}{\partial t}$ και ένα ανάδελτα (gradient) δυναμικού, ∇V_f :

$$-\int_{\Omega_{I}} \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \partial \Omega = I$$
(3.5.3)

Η επίπτωση του gradient δυναμικού είναι μία ομοιόμορφη χωρικά πυκνότητα ρεύματος πάνω στον αγωγό, $\stackrel{*}{J}$ που δίνεται από:

$$J = -\sigma \nabla V \tag{3.5.4}$$

και καθίσταται ένας επιπλέον άγνωστος στην τροποποιημένη εξίσωση (3.5.2). Οι ακόλουθες δύο εξισώσεις λύνονται μαζί:

$$-\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A}_{z} - \nabla \times \overrightarrow{\mathbf{H}_{c}} = \overset{*}{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_{z}}{\partial t}$$
(3.5.5)

$$\int_{\Omega_{J}} \left(-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \overset{*}{J} \right) \partial \Omega = \int_{\Omega_{J}} J_{s} \partial \Omega$$
(3.5.6)

Η εξίσωση (3.5.6) επαναλαμβάνεται για κάθε ομάδα περιοχών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του συνολικού ρεύματος σε έναν αγωγό με την εξίσωση (3.5.6) εξαρτάται από το χωρικό ολοκλήρωμα της μεταβολής του διανυσματικού δυναμικού ως προς το χρόνο πάνω σε όλη την περιοχή του αγωγού. Είναι σημαντικό, λοιπόν, το χρονικό βήμα να είναι αρκούντως μικρό ώστε να απεικονίζεται ο όρος αυτός με ακρίβεια.

3.5.4 Εξωτερικά κυκλώματα

Μεταβατικές επιλύσεις μπορούν να διεγερθούν είτε από πηγές ρεύματος είτε από πηγές τάσης συνδεδεμένες μέσω εξωτερικών κυκλωμάτων με το μοντέλο. Η πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να οριστεί για κάθε περιοχή παρέχεται μέσω μίας πηγής ρεύματος, ανεξάρτητης από τις ιδιότητες των coils (ένα coil είναι μία ομάδα περιοχών με τον ίδιο αριθμό αγωγού (παράμετρο περιοχής)) που δίνονται στο ρεύμα σαν συνάρτηση του χρόνου. Η επιλογή οδήγησης με τάση επιτρέπει σε μία ομάδα coils να οριστούν ως ένα κύκλωμα που συνδέεται σε μία εξωτερική πηγή τάσης σε σειρά με μία εξωτερική αντίσταση, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή.

3.5.5 Χρονικός βηματισμός (Time-stepping)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στο OPERA-2D/TR είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφτηκε στην παράγραφο 3.4. Όμως οι όροι των \vec{A} και $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ στις εξισώσεις (3.5.2) παράγουν μήτρες , που αναφέρονται ως **R** και **S**. Η διαδικασία Galerkin οδηγεί σε μία εξίσωση μητρών:

$$R\vec{A} + S\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{B} = 0$$
(3.5.7)

όπου \vec{A} είναι τώρα ένα διάνυσμα αγνώστων δυναμικών και \vec{B} ένα διάνυσμα από όρους εισόδου. Η επίλυση της εξίσωσης (3.5.7) βασίζεται επίσης στη διαδικασία

Galerkin. Χρησιμοποιώντας μία πρώτου βαθμού εξίσωση χρόνου τα \vec{A} και \vec{B} καθίστανται διακριτά ως προς αυτόν:

$$\vec{A}(t) = (1 - \tau)a_n + \tau a_{n+1}$$
 (3.5.8)

$$\vec{B}(t) = (1 - \tau)b_n + \tau b_{n+1}$$
(3.5.9)

όπου

$$\tau = \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} \tag{3.5.10}$$

και a_n , b_n είναι οι τιμές των \vec{A} και \vec{B} στο χρόνο t_n . Χρήση του τ ως το βάρος σε μία λύση της σταθμισμένης υπολειπόμενης μεθόδου διατύπωσης Galerkin της εξίσωσης (3.5.7) οδηγεί σε μία επαναληπτική σχέση μεταξύ των a_{n+1} και a_n :

$$\left(\mathbf{R}(1-\theta)-\frac{S}{\Delta t}\right)a_{n}+\left(R\theta+\frac{S}{\Delta t}\right)a_{n+1}+b_{n}(1-\theta)+b_{n+1}\theta=0$$
(3.5.11)

3.5.5.1 Προσαρμοστικός χρονικός βηματισμός (Adaptive time-stepping)

Όλες οι συναρτήσεις εισόδου ξεκινούν χρησιμοποιώντας ένα ελάχιστο χρονικό βήμα. Μετά το πρώτο, το χρονικό βήμα ρυθμίζεται αυτόματα ώστε να επιτύχει σχετικό σφάλμα χρονικού βηματισμού λιγότερο από μία καθορισμένη από το χρήστη ανοχή. Το χρονικό βήμα αυξάνεται όταν το σφάλμα είναι πολύ λιγότερο από την ανοχή, ή μειώνεται αν το σφάλμα πλησιάζει σε αυτήν. Το χρονικό βήμα δεν μπορεί να πέσει ποτέ κάτω από το ελάχιστο χρονικό βήμα. Για μη γραμμικά προβλήματα, μία τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson συνδέεται με την επίλυση της εξίσωσης (3.5.11).

<u>3.5.5.2 Σταθερό χρονικό βήμα (Fixed time step)</u>

Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να προτιμήσει την επιλογή σταθερού χρονικού βηματισμού, όπου το χρονικό βήμα παραμένει σταθερό (με τιμή που έχει καθοριστεί από τον ίδιο το χρήστη).

3.5.6 Επανεκκινήσεις

Μπορούμε να επανεκκινήσουμε το OPERA-2D/TR από ένα αρχείο αποτελεσμάτων. Αυτό επιτρέπει σε μεταβατικές λύσεις να συνεχιστούν για μεγαλύτερες τιμές χρόνου, ή εναλλακτικά τα προγράμματα Στατικής (Static - ST) ή Μόνιμης Κατάστασης (Steady State - AC) ανάλυσης μπορούν να παρέχουν μία λύση για επανεκκίνηση, δίνοντας τη δυνατότητα σε περιπτώσεις «switch-off» (TTOFF) να μελετηθούν. Στατικές και AC λύσεις είναι σαν μεταβατικές λύσεις για t=0.

3.5.7 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2D/TR

Ο χρήστης μπορεί να δώσει τις πιο κάτω εντολές:

<u>Γραμμική ή μη γραμμική λύση (Linear or Non-linear material analysis)</u>

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 μπορούμε να επιλέξουμε γραμμική ή μη γραμμική λύση. Για γραμμική επίλυση χρησιμοποιείται η τιμή της επιτρεπτότητας που δίνεται ως παράμετρος της περιοχής ενώ για μη γραμμική επίλυση (μη γραμμικά υλικά) χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές BH ή DE. Στην περίπτωση της μη γραμμικής επίλυσης μπορούν να ρυθμιστούν οι ακόλουθες παράμετροι:

- Αριθμός επαναλήψεων: η τιμή που εισάγεται θέτει ένα όριο στο μέγιστο αριθμό μη γραμμικών επαναλήψεων ανά χρονικό βήμα.
- Ανοχή: η τιμή που εισάγεται είναι η ανοχή σύγκλισης που πρόκειται να εφαρμοστεί σε σχετική αλλαγή της λύσης.
- <u>Χρονικό βήμα Προσαρμοστικό ή σταθερό (Adaptive or fixed time step)</u>

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει το χρονικό βήμα στο οποίο κάθε λύση υπολογίζεται, ή να θέσει ένα προσαρμοστικό χρονικό βήμα. Στην ολοκλήρωση του προσαρμοστικού χρονικού βηματισμού, μία παραλλαγή χρονικού βήματος υπολογίζεται ώστε να επιτύχει μία προορισμένη από το χρήστη σχετική ανοχή μεταξύ διαδοχικών χρονικών βημάτων. Γενικά, οι τιμές για την ανοχή θα πρέπει να είναι μεταξύ 0.03 και 0.0001, αλλά τιμές πέρα από αυτή την περιοχή μπορούν να δοθούν.

Ο τρόπος χρονικού βηματισμού ρυθμίζεται από το πρώτο tab του παραθύρου «Transient Analysis» με τίτλο «Time stepping», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Στην περίπτωση αυτή έχει επιλεγεί σταθερό χρονικό βήμα 0.01.

• <u>Χρόνοι εξόδου (Output times)</u>

Για να δούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης, μία λίστα χρόνων στους οποίους η λύση αποθηκεύεται πρέπει να χορηγηθεί. Οι χρόνοι αυτοί μπορούν να καθοριστούν από το δεύτερο tab του παραθύρου «Transient Analysis» με τίτλο «Output times» πατώντας «Change». Στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε τους χρόνους στους οποίους επιθυμούμε να δούμε τη λύση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11:

Output Points				? ×
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0				•
New output time				
Add	Replace	Insert	Delete	Clear
ОК				

Σχήμα 3.11: Επιλογή χρόνων εξόδου (Output times)

Στην περίπτωση του σχήματος 3.11 είχαμε επιλέξει χρόνους παρατήρησης από 0.1 ως 10 με βήμα 0.1. Ένας γρήγορος τρόπος για να εισάγουμε γρήγορα πολλούς χρόνους με σταθερο διάστημα μεταξύ διαδοχικών είναι να πληκτρολογήσουμε: από;εώς;βήμα. Δηλαδή για την παραπάνω περίπτωση πληκτρολογήσαμε 0.1;10;0.1 και πατήσαμε Add.

Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση, στη μετ-επεξεργασία (άνοιγμα του αντίστοιχου αρχείου .tr που δημιουργήθηκε μετά το πέρας της ανάλυσης) μπορούμε να δούμε τη λύση του προβλήματος στις διάφορες χρονικές στιγμές που είχαμε προκαθορίσει ακολουθώντας το File → Read another case ή απλά πατώντας στο εικονίδιο 2.

Συνάρτηση εισόδου για αγωγούς και κυκλώματα

Μία συνάρτηση εισόδου για κάθε καθορισμένο εξωτερικό κύκλωμα πρέπει να δοθεί. Είσοδος μπορεί να δοθεί σε κάθε χαρακτηρισμένο αγωγό (που δεν ανήκει σε κύκλωμα). Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι είσοδοι σταθερού ρεύματος (παράγουν σταθερό πεδίο). Μία προεπιλεγμένη είσοδος μπορεί να οριστεί για χρήση από οποιαδήποτε πηγή δεν έχει σαφώς οριστεί. Σύνορα μη μηδενικού δυναμικού

οδηγούνται από την είσοδο της περιοχής (αν υπάρχει), αλλιώς από την προεπιλεγμένη. Αν είναι απαραίτητο, το πρόγραμμα επίσης ζητά πληροφορίες για συχνότητα, γωνία φάσης, χρονική σταθερά, όνομα αρχείου πίνακα χρόνων (.tt) κτλ (Σχήμα 3.8).

Νέα επίλυση ή επανεκκίνηση

Αυτό είναι διαθέσιμο μόνο αν το αρχείο .op2 ήδη περιέχει μία λύση. Το πρόγραμμα επίλυσης TR επίσης επιτρέπει σε μία λύση να συνεχιστεί από το αποτέλεσμα που περιέχεται σε ένα υπάρχον αρχείο αποτελεσμάτων που δημιουργήθηκε με ένα από τα προγράμματα ανάλυσης ST, AC ή DM.

• <u>Αποτελέσματα σε πίνακα</u>

Ένα αρχείο .log σε μορφή πίνακα μπορεί να δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Το αρχείο .log μπορεί να περιέχει ως και 20 μεταβλητές, καθορισμένες από το χρήστη σταθερές ή εκφράσεις. Αποτελείται από στήλες, μία για κάθε μεταβλητή, σταθερά ή έκφραση, όπου καταγράφονται για κάθε χρόνο εξόδου (output time) οι αντίστοιχες τιμές.

Η εντολή για δημιουργία του αρχείου .log μπορεί να δοθεί με επιλογή του τέταρτου από αριστερά tab του παραθύρου «Transient Analysis» με τίτλο «Logging» και πάτημα στο «Change». Στο παράθυρο που ανοίγει μπορούμε να επιλέξουμε τις μεταβλητές, σταθερές ή εκφράσεις που θέλουμε να περιέχει το αρχείο .log, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Η μόνη μεταβλητή που αναγνωρίζεται από τη μεταβατική ανάλυση είναι η TTIME. Μεταβλητές, σταθερές ή εκφράσει το σύστημα απλά δεν εμφανίζονται στο αρχείο .log. Στην περίπτωση του σχήματος 3.12 δηλαδή το αρχείο θα περιέχει μόνο μία στήλη, αυτή της TTIME (η μεταβλητή SCALE αφορά τη στατική ανάλυση ST).

Logging data	N X						
Logging	Logging						
From data file name ()) Specified by user 🔘 None						
Log file name							
File name							
Component							
1 to 10 11 to 20							
1 TTIME	2 SCALE						
3	4						
5	6						
7	8						
9	10						
OK Cancel							

Σχήμα 3.12: Η εντολή για δημιουργία αρχείου .log

3.5.8 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2D/TR

Η επίλυση προβλημάτων με τη μεταβατική ανάλυση γίνεται από το κύριο μενού του προγράμματος και ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- Enter file name: Εισάγουμε το αρχείο του μοντέλου που είναι σε μορφή (.op2)
- Επιλογή μεταβατικής ανάλυσης (TR Transient Analysis)
- Επεξεργασία αρχείου (.op2)
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής (.tr)
- Έξοδος από το πρόγραμμα ανάλυσης

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανοίγουμε το αρχείο μορφής (.tr) που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ανάλυσης.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PC OPERA-2D

Για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς εξετάστηκαν δύο διαφορετικές δομές εδάφους, ημισφαιρική και οριζόντια διαστρωμάτωση, ενώ για κάθε μία δομή εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις, στις οποίες διέφεραν οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στρωμάτων. Οι διατάξεις, που προσομοιώθηκαν, παρουσιάζουν αξονική συμμετρία, η οποία και λήφθηκε υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί απλοποίησή του. Επίσης, η πλεγματοποίηση του μοντέλου (κατόπιν δοκιμών) και ο καθορισμός των οριακών συνθηκών (σε ποια απόσταση από τη διάταξη το δυναμικό μηδενίζεται) έγιναν κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της στατικής και μεταβατικής ανάλυσης. Στη στατική ανάλυση εφαρμόστηκε στο ηλεκτρόδιο σταθερή τάση 1000V, μία τιμή που είχε χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες διπλωματικές εργασίες [8, 41], ενώ για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς επιβάλλαμε στο ηλεκτρόδιο την ακόλουθη διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση [42]:

$$V(t) = 35 \left(e^{-16667t} - e^{-1000000t} \right) \, \text{kV}$$

όπου t σε μs. Η κρουστική αυτή τάση έχει χρόνο μεγίστου $T_{\rm p}$ = 0,6μs.

4.1 Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τοποθετημένο σε έδαφος αποτελούμενο από ημισφαιρικά κελύφη

4.1.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 3m και ακτίνας 8,6mm [43]. Το μοντέλο εδάφους, που υιοθετήθηκε, έχει προταθεί στην εργασία [44] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το έδαφος αποτελείται από δύο ομόκεντρες σφαίρες με ακτίνες r_1 =5m και r_2 =10m αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης και επιτρεπτότητας κάθε ζώνης για τις τέσσερις εξεταζόμενες

περιπτώσεις. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις.



Σχήμα 4.1: Η γεωμετρία του προβλήματος

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
$\rho_1 [\Omega m]$	50	2000	1000	50
$\rho_2 \left[\Omega m\right]$	400	400	50	1000
ρ ₃ [Ωm]	1000	100	1000	200
ε ₁	41	3.5	9	41
ε2	16	16	41	9
ε3	9	36	9	20

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του εδάφους, που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-2D φαίνεται στο Σχήμα 4.2, όπου είναι φανερό ότι λάβαμε υπ' όψιν την αξονική συμμετρία του, ενώ μία λεπτομερέστερη εικόνα της γεωμετρίας στην περιοχή του ηλεκτροδίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3:



Σχήμα 4.2: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-2D



Σχήμα 4.3: Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου

4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις.



Σχήμα 4.4: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος

Στα Σχήματα 4.5-4.8 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού μετά από τη στατική ανάλυση για όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις, ενώ στα Σχήματα 4.9-4.12 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή δυναμικού μετά από τη μεταβατική ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0,6μs).



Σχήμα 4.5: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=400 και ρ₃=1000 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.6: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=2000, ρ₂=400 και ρ₃=100 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.7: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=1000, ρ₂=50 και ρ₃=1000 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.8: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=1000 και ρ₃=200 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.9: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=400 και ρ₃=1000 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.10: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=2000, ρ₂=400 και ρ₃=100 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.11: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=1000, ρ₂=50 και ρ₃=1000 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.12: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=1000 και ρ₃=200 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.13-4.16 τα τρισδιάστατα γραφήματα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους με άξονες την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο, το χρόνο και την τιμή του δυναμικού. Στο επίπεδο που καθορίζουν οι άξονες του χρόνου και του επιφανειακού δυναμικού στα τρισδιάστατα γραφήματα σχηματίζεται η μορφή της διπλοεκθετικής κρουστικής που επιβάλλαμε στο ηλεκτρόδιο κατά τη μεταβατική ανάλυση του συστήματος γείωσης. Τέλος, στα Σχήματα 4.17-4.20 φαίνονται οι κατανομές του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο για επιλεγμένες χρονικές στιγμές της μεταβατικής ανάλυσης, που αντιστοιχούν σε 0,3T_p, 0,6T_p, T_p, 2T_p, 5T_p, 10T_p και 100T_p, και συγκρίνονται με τη στατική ανάλυση. Όπου χρειάζεται, παρατίθεται εσωτερικά και μεγέθυνση της αντίστοιχης κατανομής.



Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ_1 =50, ρ_2 =400 και ρ_3 =1000



Σχήμα 4.14: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ₁=2000, ρ₂=400 και ρ₃=100



Σχήμα 4.15: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ_1 =1000, ρ_2 =50 και ρ_3 =1000



Σχήμα 4.16: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ₁=50, ρ₂=1000 και ρ₃=200



Σχήμα 4.17: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=50, ρ₂=400 και ρ₃=1000

Από τα Σχήματα 4.9 και 4.17 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 50Ωm σε 400Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 22kV. Στα 10m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 400Ωm σε 1000Ωm, και για t=0,6μs το δυναμικό έχει τιμή περίπου 16kV. Είναι φανερό ότι στα σημεία που αλλάζει η ρ αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό. Συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η ειδική αντίσταση, τόσο πιο αργά μεταβάλλεται το δυναμικό συναρτήσει της απόστασης.



Σχήμα 4.18: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=2000, ρ₂=400 και ρ₃=100

Από τα Σχήματα 4.10 και 4.18 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Λόγω της πολύ μεγάλης ειδικής αντίστασης του εδάφους στο οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο το δυναμικό μειώνεται πολύ γρήγορα (εμφάνιση επικίνδυνων βηματικών τάσεων). Έτσι, στα 5m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 2000Ωm σε 400Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 0,9kV. Στα 10m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 400Ωm σε 100Ωm, και για t=0,6μs το δυναμικό έχει τιμή περίπου 0,1kV.



Σχήμα 4.19: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=1000, ρ₂=50 και ρ₃=1000

Από τα Σχήματα 4.11 και 4.19 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Λόγω της μεγάλης ειδικής αντίστασης του εδάφους στο οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο το δυναμικό μειώνεται πολύ γρήγορα, με συνέπεια να έχουμε ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων από την περιοχή του ηλεκτροδίου μέχρι τα 5m. Στα 5m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 1000Ωm σε 50Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 2kV. Στα 10m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 50Ωm σε 1000Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 1,8kV. Παρατηρούμε ότι το δυναμικό μειώθηκε μόλις κατά 0,2kV σε μία απόσταση 5 μέτρων (5-10m). Από τα 10m και πέρα, όπου η ρ έχει πάλι πολύ μεγάλη τιμή, το δυναμικό μεταβάλλεται με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό, συνεπώς και σε αυτήν την περιοχή αναπτύσσονται επικίνδυνες βηματικές τάσεις. Είναι φανερή, λοιπόν, σε αυτήν την περίπτωση η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό. Χαρακτηριστικό είναι το "σκαλοπάτι" που σχηματίζεται στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.15 και 4.19.



Σχήμα 4.20: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=50, ρ₂=1000 και ρ₃=200

Από τα Σχήματα 4.12 και 4.20 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 50Ωm σε 1000Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 15kV. Στα 10m, όπου μεταβάλλεται η ρ από 1000Ωm σε 200Ωm, το δυναμικό έχει τιμή περίπου 2kV. Από τα 10m και πέρα, το δυναμικό μειώνεται με αρκετά μικρό ρυθμό. Είναι

φανερό ότι στα σημεία που αλλάζει η ρ αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.

Αξίζει να συγκρίνουμε τις Περιπτώσεις 1 και 4, καθώς αυτές έχουν την ίδια τιμή ειδικής αντίστασης στο πρώτο κέλυφος (50Ωm) αλλά διαφορετικές στο δεύτερο (400Ωm και 1000Ωm αντίστοιχα). Από τα Σχήματα 4.9 και 4.12, παρατηρούμε ότι στην Περίπτωση 4 το δυναμικό έχει λάβει στα 15m τιμή 665V, ενώ για τη γεωμετρία της Περίπτωσης 1 το δυναμικό στην ίδια απόσταση είναι 4465V, τιμή κατά πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την Περίπτωση 4. Συνεπώς, για ίδια αντίσταση πρώτου κελύφους, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δεύτερου, τόσο πιο απότομα μεταβάλλεται το δυναμικό. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται πιο καθαρά στα Σχήματα 4.13, 4.16, 4.17 και 4.20, όπου βλέπουμε ότι σε απόσταση 5m από το ηλεκτρόδιο η τιμή του δυναμικού στην Περίπτωση 1 είναι 22kV, ενώ στην Περίπτωση 4 είναι 15kV.

Τέλος, στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται για λόγους σύγκρισης και ευκρίνειας η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους μετά από τη στατική ανάλυση και για τις τέσσερεις περιπτώσεις.



Σχήμα 4.21: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για τις 4 περιπτώσεις μετά από τη στατική ανάλυση

4.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται μεγάλη πυκνότητα των ισοδυναμικών ζωνών γύρω από το ηλεκτρόδιο ενώ γίνονται πιο αραιές καθώς αυξάνεται η απόσταση από το ηλεκτρόδιο (Σχήματα 4.5-4.12). Αυτό συμβαίνει γιατί όπως παρατηρούμε και από

τα διαγράμματα της μεταβολής του δυναμικού ως προς την απόσταση (Σχήματα 4.13-4.21) το δυναμικό ελαττώνεται ταχέως στην περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο.

Όσον αφορά την επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο, τόσο πιο πυκνές είναι οι ισοδυναμικές ζώνες και άρα ταχύτερη η ελάττωση του δυναμικού, όπως είδαμε στα Σχήματα 4.6, 4.7, 4.10 και 4.11 (Περιπτώσεις 2 και 3).

Αναλυτικότερα παρατηρούμε ότι:

- Όταν από περιοχή μικρότερης ειδικής αντίστασης γίνεται μετάβαση σε περιοχή μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης οι ισοδυναμικές ζώνες γίνονται πυκνότερες (Περιπτώσεις 1 και 4). Η μεγαλύτερη πυκνότητα των ισοδυναμικών ζωνών παρατηρείται κοντά στο όριο των δύο περιοχών στην περιοχή υψηλότερης ειδικής αντίστασης. Αυτό φαίνεται καθαρά στα Σχήματα 4.5 και 4.9, καθώς και στα Σχήματα 4.8 και 4.12 στην απόσταση των 5m όπου γίνεται μετάβαση από περιοχή ειδικής αντίστασης 50 Ω m σε περιοχή ειδικής αντίστασης 400 Ω m και 1000 Ω m αντίστοιχα. Το δυναμικό τότε ελαττώνεται ταχέως με αποτέλεσμα σε μικρή σχετικά απόσταση να παρατηρείται μεγάλη διαφορά δυναμικού (υψηλή τιμή της βηματικής τάσης). Αυτό μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για άτομα που βρίσκονται σε αυτή την περιοχή. Από τα διαγράμματα του δυναμικού σε συνάρτηση με τη απόσταση παρατηρούμε ότι στα σημεία που γίνεται μετάβαση από περιοχή μικρότερης ειδικής αντίστασης σε περιοχή μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης αυξάνεται η κλίση της καμπύλης του δυναμικόυ αφού το δυναμικό ελαττώνεται ταχύτερα. Κάτι τέτοιο βλέπουμε για παράδειγμα στα Σχήματα 4.17 και 4.20 στην απόσταση των 5m. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ρ του δεύτερου κελύφους τόσο χαμηλότερο είναι εκεί το δυναμικό.
- Όταν γίνεται μετάβαση από περιοχή με μεγαλύτερη τιμή ειδικής αντίστασης σε περιοχή μικρότερης ειδικής αντίστασης παρατηρούμε ότι οι ισοδυναμικές ζώνες γίνονται πιο αραιές (Σχήματα 4.10 και 4.11). Επίσης παρατηρούμε ότι μειώνεται η κλίση της καμπύλης του δυναμικού στα διαγράμματα του δυναμικού σε συνάρτηση με την απόσταση. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περιοχή με μικρότερη ειδική αντίσταση το δυναμικό ελατώνεται πιο αργά. Αυτό φαίνεται για παράδειγμα από τα Σχήματα 4.14, 4.18, 4.15 και 4.19 στην απόσταση των 5m, όπου γίνεται μετάβαση από περιοχή ειδικής αντίστασης 2000Ωm και 1000Ωm

αντίστοιχα σε περιοχή με ειδική αντίσταση 400Ωm και 50Ωm αντίστοιχα, καθώς και από τα Σχήματα 4.16 και 4.20 στην απόσταση των 10m, όπου γίνεται μετάβαση από τα 1000Ωm στα 200Ωm.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, και παρατηρώντας συνολικά τα Σχήματα 4.5-4.21 βλέπουμε ότι η μείωση του δυναμικού είναι πιο ραγδαία στις περιπτώσεις 2 και 3 απ' όσο στις περιπτώσεις 1 και 4. Αυτό αποδίδεται στις υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης της εγγύτερης στο ηλεκτρόδιο ζώνης, που οδηγεί σε εμφάνιση υψηλότερων τιμών βηματικής τάσης. Ιδιαίτερα στα Σχήματα 4.17-4.21 μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα για όλες τις περιπτώσεις ότι σε αποστάσεις 5m και 10m από το ηλεκτρόδιο, όπου οι ιδιότητες του εδάφους αλλάζουν, αλλάζουν και οι κλίσεις των καμπυλών.

Αυτό, όμως, που έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση της στατικής και μεταβατικής ανάλυσης. Από τα Σχήματα 4.5-4.20 είναι εμφανής η μεταβαλλόμενα έντονη καταπόνηση του συστήματος γείωσης μετά την επιβολή της κρουστικής τάσης, σε σχέση με τη σταθερή τάση της στατικής ανάλυσης. Ιδιαίτερα στα Σχήματα 4.17-4.20, βλέπουμε πως κυμαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για τις διάφορες επιλεγμένες χρονικές στιγμές. Από όσα έχουν αναφερθεί συμπεραίνουμε, ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όχι μόνο η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι διάφορες ανομοιομορφίες του, αλλά και οι κρουστικές τάσεις που είναι πιθανόν να πλήξουν το σύστημα, έως ότου αυτές αποσβεθούν.

4.2 Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τοποθετημένο σε έδαφος με οριζόντια διαστρωμάτωση

4.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος

4.2.1.1 Ηλεκτρόδιο μήκους 2m

Το σύστημα γείωσης σε αυτήν την περίπτωση αποτελείται από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 2m και ακτίνας 10mm. Η ανομοιομορφία του εδάφους έχει μοντελοποιηθεί σε πολλά οριζόντια στρώματα με διαφορετικές ειδικές αντιστάσεις, ώστε το πρόβλημα να θεωρείται συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Λόγω της αξονικής αυτής συμμετρίας, αρκεί η σχεδίαση του μοντέλου στο ένα ημιεπίπεδο. Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος όπως προσομοιώθηκε στο PC OPERA-2D, ενώ μία λεπτομερέστερη εικόνα της γεωμετρίας στην περιοχή του ηλεκτροδίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23. Τα τρία πρώτα στρώματα εδάφους έχουν βάθη h₁=3m, h₂=4m και h₃=6m.



Σχήμα 4.22: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-2D



Σχήμα 4.23: Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου 2m

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης και επιτρεπτότητας κάθε στρώματος για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις.

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
$\rho_1 \left[\Omega m \right]$	50	200	200	1000
$\rho_2 \left[\Omega m\right]$	200	100	1000	100
ρ ₃ [Ωm]	500	500	50	1000
ρ ₄ [Ωm]	1000	1000	500	500
ε ₁	41	20	20	9
ε2	20	36	9	36
ε3	15	15	41	9
ε ₄	9	9	15	15

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του εδάφους, που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

4.2.1.2 Ηλεκτρόδιο μήκους 5m

Στη συνέχεια προσομοιώσαμε τις Περιπτώσεις 2 και 3 για ηλεκτρόδιο μήκους 5m και συγκρίναμε τα αποτελέσματα. Το ηλεκτρόδιο των 5m φτάνει μέχρι τη μέση του δεύτερου στρώματος. Ο λόγος, λοιπόν, που επιλέξαμε μόνο αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι γιατί έχουν την ίδια ειδική αντίσταση στο πρώτο στρώμα εδάφους, ενώ για το δεύτερο στρώμα οι ειδικές αντιστάσεις τους διαφέρουν σημαντικά.

Μία λεπτομερής εικόνα της γεωμετρίας στην περιοχή του ηλεκτροδίου μήκους 5m παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24:



Σχήμα 4.24: Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου 5m

4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.2.2.1 Ηλεκτρόδιο μήκους 2m

Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις.:



Σχήμα 4.25: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος

Στα Σχήματα 4.26-4.29 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού μετά από τη στατική ανάλυση για απόσταση μέχρι τα 15m από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 2m για όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις, ενώ στα Σχήματα 4.30-4.33 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή δυναμικού μετά από τη μεταβατική ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0,6μs).



Σχήμα 4.26: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=200, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.27: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=100, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.28: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.29: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=1000, ρ₂=100, ρ₃=1000 και ρ₄=500 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.30: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=50, ρ₂=200, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.31: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=100, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.32: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.33: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=1000, ρ₂=100, ρ₃=1000 και ρ₄=500 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.34-4.37 τα τρισδιάστατα γραφήματα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους με άξονες την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο, το χρόνο και την τιμή του δυναμικού. Στο επίπεδο που καθορίζουν οι άξονες του χρόνου και του επιφανειακού δυναμικού στα τρισδιάστατα γραφήματα σχηματίζεται η μορφή της διπλοεκθετικής κρουστικής που επιβάλλαμε στο ηλεκτρόδιο κατά τη μεταβατική ανάλυση του συστήματος γείωσης. Τέλος, στα Σχήματα 4.38-4.41 παρουσιάζονται οι κατανομές του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο για επιλεγμένες χρονικές στιγμές της μεταβατικής ανάλυσης, που αντιστοιχούν σε 0,3T_p, 0,6T_p, T_p, 2T_p, 5T_p, 10T_p και 100T_p, και συγκρίνονται με τη στατική ανάλυση. Όπου χρειάζεται, παρατίθεται εσωτερικά και μεγέθυνση της αντίστοιχης κατανομής.



Σχήμα 4.34: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ₁=50, ρ₂=200, ρ₃=500 και ρ₄=1000



Σχήμα 4.35: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ_1 =200, ρ_2 =100, ρ_3 =500 και ρ_4 =1000



Σχήμα 4.36: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500



Σχήμα 4.37: Τρισδιάστατο γράφημα κατανομής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για ρ_1 =1000, ρ_2 =100, ρ_3 =1000 και ρ_4 =500



Σχήμα 4.38: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=50, ρ₂=200, ρ₃=500 και ρ₄=1000

Από τα Σχήματα 4.30 και 4.38 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m το δυναμικό έχει τιμή 8kV, στα 10m η τιμή του είναι περίπου 6kV και στα 15m έχει μειωθεί στα 5kV.



Σχήμα 4.39: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=200, ρ₂=100, ρ₃=500 και ρ₄=1000

Από τα Σχήματα 4.31 και 4.39 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m το δυναμικό έχει τιμή 3,4kV, στα 10m η τιμή του είναι 2,3kV και στα 15m έχει μειωθεί περίπου στα 1,9kV.



Σχήμα 4.40: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500

Από τα Σχήματα 4.32 και 4.40 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m το δυναμικό έχει τιμή περίπου 4kV, στα 10m η τιμή του είναι 2,1kV και στα 15m έχει μειωθεί περίπου στα 1,3kV.



Σχήμα 4.41: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ₁=1000, ρ₂=100, ρ₃=1000 και ρ₄=500

Από τα Σχήματα 4.33 και 4.41 παρατηρούμε ότι για t=0,6μs το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο και γύρω από αυτό λαμβάνει τιμές περί τα 34,5kV. Στα 5m το δυναμικό έχει τιμή περίπου 1,1kV, στα 10m η τιμή του είναι 0,5kV και στα 15m έχει μειωθεί περίπου στα 0,4kV.

Αξίζει να συγκρίνουμε τις Περιπτώσεις 2 και 3, καθώς αυτές έχουν την ίδια τιμή ειδικής αντίστασης στο πρώτο στρώμα (200Ωm) αλλά διαφορετικές στο δεύτερο (100Ωm και 1000Ωm αντίστοιχα). Στα Σχήματα 4.39 και 4.40 είδαμε ότι η τιμή του δυναμικού για την Περίπτωση 2 είναι μικρότερη σε σχέση με την Περίπτωση 3 (3,4kV έναντι 4kV) στα 5m. Στα 10m και 15m η κατάσταση αντιστρέφεται, με την περίπτωση όπου η ειδική αντίσταση του δευτέρου στρώματος είναι μεγάλη (Περίπτωση 3) να εμφανίζει μικρότερες τιμές δυναμικού. Συνεπώς, για ίδια αντίσταση πρώτου στρώματος, όσο μικρότερη είναι η αντίσταση του δευτέρου, τόσο πιο απότομα μεταβάλλεται το δυναμικό στα πρώτα μέτρα. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε ότι το ρεύμα επιλέγει πάντα την πιο εύκολη δίοδο. Έτσι, η μεγάλη ειδική αντίσταση του δευτέρου στρώματος στην Περίπτωση 3 αποτρέπει τη διείσδυση του ρεύματος σε μεγαλύτερο βάθος και ευνοεί τη διάδοσή του κατά μήκος του επιφανειακού στρώματος. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στα Σχήματα 4.31 και 4.32 από τη μορφή των ισοδυναμικών ζωνών. Τα πράγματα, όμως, είναι πολύ διαφορετικά σε περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να εισχωρήσει και στο δεύτερο στρώμα, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Τέλος, στο Σχήμα 4.42 παρουσιάζεται για λόγους σύγκρισης και ευκρίνειας η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους μετά από τη στατική ανάλυση και για τις τέσσερεις περιπτώσεις.



Σχήμα 4.42: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για τις 4 περιπτώσεις μετά από τη στατική ανάλυση

4.2.2.2 Ηλεκτρόδιο μήκους 5m

Στο Σχήμα 4.43 παρουσιάζεται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις Περιπτώσεις 2 και 3:



Σχήμα 4.43: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος

Στα Σχήματα 4.44-4.45 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού μετά από τη στατική ανάλυση για απόσταση μέχρι τα 15m από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 5m για τις εξετασθείσες περιπτώσεις, ενώ στα Σχήματα 4.46-4.47 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή δυναμικού μετά από τη μεταβατική ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0,6μs).



Σχήμα 4.44: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=100, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη στατική ανάλυση


Σχήμα 4.45: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500 μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.46: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=100, ρ₃=500 και ρ₄=1000 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs



Σχήμα 4.47: Κατανομή δυναμικού για ρ₁=200, ρ₂=1000, ρ₃=50 και ρ₄=500 μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για χρόνο 0,6μs

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.48-4.49 οι κατανομές του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 5m για τις Περιπτώσεις 2 και 3 για τη στατική και μεταβατική ανάλυση (t=0,6μs) αντίστοιχα



Σχήμα 4.48: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ηλεκτρόδιο μήκους 5m μετά από τη στατική ανάλυση



Σχήμα 4.49: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ηλεκτρόδιο μήκους 5m μετά από τη μεταβατική ανάλυση και για t=0,6μs

Είναι φανερή από τα Σχήματα 4.48 και 4.49 η επίδραση της ειδικής αντίστασης του δευτέρου στρώματος στην κατανομή του δυναμικού για ηλεκτρόδιο μήκους 5m. Στην Περίπτωση 3 όπου ρ₂=1000Ωm παρατηρούμε ότι το δυναμικό μειώνεται πολύ πιο απότομα σε σχέση με την Περίπτωση 2 όπου ρ₂=100Ωm, μία εικόνα τελείως

διαφορετική σε σχέση με τα όσα είδαμε για το ηλεκτρόδιο μήκους 2m, αλλά και ταυτόχρονα αναμενόμενη.

4.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται μεγάλη πυκνότητα των ισοδυναμικών ζωνών γύρω από το ηλεκτρόδιο ενώ γίνονται πιο αραιές καθώς αυξάνεται η απόσταση από το ηλεκτρόδιο (Σχήματα 4.26-4.33 και 4.44-4.47). Αυτό συμβαίνει γιατί όπως παρατηρούμε και από τα διαγράμματα της μεταβολής του δυναμικού ως προς την απόσταση (Σχήματα 4.34-4.42 και 4.48-4.49) το δυναμικό ελαττώνεται ταχέως στην περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο.

Όσον αφορά την επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο, τόσο πιο πυκνές είναι οι ισοδυναμικές ζώνες και άρα ταχύτερη η ελάττωση του δυναμικού, όπως φαίνεται με σύγκριση των Σχημάτων 4.25, 4.29 με τα Σχήματα 4.28, 4.32 (Περιπτώσεις 1 και 4), καθώς και από το Σχήμα 4.42.

Πρωταρχικό ρόλο στη διαμόρφωση της κατανομής του δυναμικού στην επιφάνεια για την περίπτωση εδάφους οριζόντιας διαστρωμάτωσης παίζει η ειδική αντίσταση του εδαφικού στρώματος στο οποίο είναι βυθισμένο το ηλεκτρόδιο. Αυτό φαίνεται καθαρά με σύγκριση των Σχημάτων 4.34, 4.37, 4.38 και 4.41, δηλαδή των κατανομών δυναμικού των Περιπτώσεων 1 και 4, όπου το πρώτο στρώμα έχει ειδική αντίσταση 50Ωm και 1000Ωm αντίστοιχα.

Μικρότερο αλλά καθοριστικό ρόλο παίζουν και τα άλλα στρώματα, ιδιαίτερα το δεύτερο, όπως είδαμε για τις δυο ξεχωριστές περιπτώσεις ηλεκτροδίου (μήκους 2m και 5m). Στα Σχήματα 4.39-4.40 παρατηρήσαμε την αρνητική επίδραση στην κατανομή του δυναμικού της μεγάλης ειδικής αντίστασης του δευτέρου στρώματος στην Περίπτωση 3 για το μικρό ηλεκτρόδιο, αλλά και τη σημαντικά θετική της επίδραση για την περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να διεισδύσει και στο δεύτερο στρώμα (Σχήματα 4.48-4.49). Δεν πρέπει, όμως, να ξεχνάμε ότι γρήγορη μεταβολή του δυναμικού συνεπάγεται και υψηλές βηματικές τάσεις.

Αναλυτικότερα για τα σύνορα μεταξύ των στρωμάτων παρατηρούμε ότι όταν από περιοχή μικρότερης ειδικής αντίστασης γίνεται μετάβαση σε περιοχή μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης οι ισοδυναμικές ζώνες γίνονται πυκνότερες. Η μεγαλύτερη πυκνότητα των ισοδυναμικών ζωνών παρατηρείται κοντά στο όριο των δύο περιοχών στην περιοχή υψηλότερης ειδικής αντίστασης. Αυτό φαίνεται καθαρά στα Σχήματα 4.26 και 4.28, καθώς και στα Σχήματα 4.30 και 4.32 σε βάθος 5m όπου γίνεται μετάβαση από περιοχή ειδικής αντίστασης 50Ωm και 200Ωm αντίστοιχα σε περιοχή ειδικής αντίστασης 400Ωm και 1000Ωm αντίστοιχα. Αντίθετα, όταν γίνεται μετάβαση από περιοχή με μεγαλύτερη τιμή ειδικής αντίστασης σε περιοχή μικρότερης ειδικής αντίστασης παρατηρούμε ότι οι ισοδυναμικές ζώνες γίνονται πιο αραιές. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περιοχή με μικρότερη ειδική αντίσταση το δυναμικό ελατώνεται πιο αργά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα Σχήματα 4.29 και 4.33 στο βάθος των 5m, όπου γίνεται μετάβαση από περιοχή ειδικής αντίστασης 1000Ωm σε περιοχή ειδικής αντίστασης 100Ωm.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, και παρατηρώντας συνολικά τα Σχήματα 4.26-4.42 βλέπουμε ότι η μείωση του δυναμικού είναι πιο ραγδαία στην Περίπτωση 4. Αυτό αποδίδεται στην υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης της εγγύτερης στο ηλεκτρόδιο ζώνης (1000Ωm), που οδηγεί σε εμφάνιση υψηλότερων τιμών βηματικής τάσης. Αντίθετα, η πιο ομαλή μείωση του δυναμικού συναρτήσει της απόστασης παρατηρείται στην Περίπτωση 1, λόγω της μικρής αντίστασης του στρώματος εδάφους (50Ωm) στο οποίο είναι βυθισμένο το ηλεκτρόδιο.

Αυτό, όμως, που έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση της στατικής και μεταβατικής ανάλυσης. Από τα Σχήματα 4.26-4.41 είναι εμφανής η μεταβαλλόμενα έντονη καταπόνηση του συστήματος γείωσης μετά την επιβολή της κρουστικής τάσης, σε σχέση με τη σταθερή τάση της στατικής ανάλυσης. Ιδιαίτερα στα Σχήματα 4.38-4.41, βλέπουμε πως κυμαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για τις διάφορες επιλεγμένες χρονικές στιγμές.

Από όσα έχουν αναφερθεί συμπεραίνουμε, ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όχι μόνο η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι διάφορες ανομοιομορφίες του, αλλά και οι κρουστικές τάσεις που είναι πιθανόν να πλήξουν το σύστημα, έως ότου αυτές αποσβεθούν.

101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη και προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Για τη μεταβατική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μεταβατικής ανάλυσης (TR) του δισδιάστατου προγραμματιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-2D Version 13.0.

Για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς εξετάστηκαν δύο διαφορετικές δομές εδάφους, ημισφαιρική και οριζόντια διαστρωμάτωση, ενώ για κάθε μία δομή εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις, στις οποίες διέφεραν οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στρωμάτων του εδάφους. Οι διατάξεις, που προσομοιώθηκαν, παρουσίαζαν αξονική συμμετρία, η οποία και λήφθηκε υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί απλοποίησή του.

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της στατικής και μεταβατικής ανάλυσης. Για τη στατική ανάλυση εφαρμόστηκε στο ηλεκτρόδιο μία ενδεικτική σταθερή τάση, που είχε χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες διπλωματικές εργασίες, ενώ για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς επιβάλλαμε στο ηλεκτρόδιο μία αρκετά γρήγορη διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι:

- Στο έδαφος με ημισφαιρικά κελύφη όλα τα στρώματα επιδρούν σημαντικά στην κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Πρωταρχικό ρόλο παίζει, φυσικά, η τιμή της ειδικής αντίστασης της εγγύτερης στο ηλεκτρόδιο ζώνης, αλλά είδαμε ότι στα σημεία που αλλάζει η ειδική αντίσταση αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό. Επιπλέον, μέσω της σύγκρισης των περιπτώσεων παρατηρήσαμε ότι για ίδια αντίσταση πρώτου κελύφους, όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική αντίσταση του δεύτερου, τόσο πιο γρήγορα μειώνεται το δυναμικό κατά μήκος της επιφάνειας.
- Πρωταρχικό ρόλο στη διαμόρφωση της κατανομής του δυναμικού στην επιφάνεια για την περίπτωση εδάφους οριζόντιας διαστρωμάτωσης παίζει η

ειδική αντίσταση του εδαφικού στρώματος στο οποίο είναι βυθισμένο το ηλεκτρόδιο. Μικρότερο αλλά καθοριστικό ρόλο παίζουν και τα άλλα στρώματα, ιδιαίτερα το δεύτερο. Συγκεκριμένα, για ηλεκτρόδιο μικρού μήκους που δεν εισχωρεί στο δεύτερο στρώμα, παρατηρήσαμε ότι για ίδια αντίσταση πρώτου στρώματος, όσο μικρότερη είναι η αντίσταση του δευτέρου, τόσο πιο απότομα μεταβάλλεται το δυναμικό στα πρώτα μέτρα της εδαφικής επιφάνειας από το ηλεκτρόδιο. Αντίθετα, για την περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να διεισδύσει και στο δεύτερο στρώμα, η υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του δεύτερου στρώματος επιδρά θετικά μειώνοντας γρήγορα το δυναμικό κατά μήκος της επιφάνειας, με συνέπεια όμως την εμφάνιση υψηλών βηματικών τάσεων.

Η επιβολή της κρουστικής τάσης προκαλεί μια μεταβαλλόμενα έντονη καταπόνηση του συστήματος γείωσης, σε αντίθεση με τη σταθερή τάση της στατικής ανάλυσης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όχι μόνο η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι διάφορες ανομοιομορφίες του, αλλά και οι κρουστικές τάσεις, που είναι πιθανόν να πλήξουν το σύστημα, έως ότου αυτές αποσβεθούν.

Όσον αφορά μελλοντικές εργασίες, κρίνεται σκόπιμη η μοντελοποίηση πλεγμάτων γείωσης και συστημάτων γείωσης που δεν παρουσιάζουν αξονική συμμετρία με το τρισδιάστατο προγραμματιστικό πακέτο πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-3D και επίλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς τους. Επιπλέον, διαφορετικές κρουστικές τάσεις με διαφορετικούς χρόνους ανόδου (αν μας ενδιαφέρει η επαγωγική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου) και ημίσεως εύρους (αν μας ενδιαφέρει η ενέργεια που ταλαιπωρεί το ηλεκτρόδιο) θα μπορούσαν να προσομοιωθούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σεμινάριο, "Γειώσεις δικτύων και εγκαταστάσεων", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 6-10 Οκτωβρίου 1997.
- [2] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80 – 1986), 2000.
- [3] Περής Γ. Χάλαρης, "Γειώσεις Νομοθεσία και Κανονισμοί", Σεμινάριο:
 "Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων".
- [4] Μ. Λορέντζου, "Συμβολή στη μοντελοποίηση και ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γειώσεων", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2001.
- [5] http://www.elemko.gr
- [6] Ν. Παναγιωτόπουλος: "Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων", Σεμινάριο: "Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων".
- [7] http://faraday.ee.auth.gr/kosmanis/files/grounding.ppt
- [8] Χατζηπαντελής Ε. Δημήτρης, "Επίδραση της ειδικής αντίστασης εδάφους στην κατανομή του δυναμικού εδάφους για διάφορα συστήματα γείωσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2001.
- [9] Β. Κ. Παπαδιάς: "Εισαγωγή στην τεχνική των γειώσεων", Σεμινάριο:
 "Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων".
- [10] Δήμητρα Π. Βάρλα, "Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004.
- [11] Π. Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384", Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [12] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
- [13] Ιωάννης Φ. Γκόνος, "Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης"
 Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2002.

- [14] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, "Υπολογιστική προσομοίωση συστημάτων γείωσης" Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004.
- [15] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.
- [16] S. S Devgan., E. R Whitehead, "Analytical models for distributed grounding systems", IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 92, Sep /Oct 1973.
- [17] K. J. Nixon, I. R. Jandrell, "Initial Design of a System to determine the Behaviour of an Earth Electrode subjected to real Lightning Discharges", France, ICLP 2004.
- [18] K. J. Nixon, "Quantifying the lightning transient performance of an earth electrode," IEEE 6th Africon Conference 2002, Vol. 2, 2nd -4th October, pp.665-670.
- [19] S. Visacro, *Member, IEEE*, and G. Rosado, "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation", February 2009.
- [20] L. V. Bewley, "Theory and tests of the counterpoise", Elec. Engr., Vol. 53, pp.1163-1172, Aug 1934.
- [21] P. L. Bellaschi, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, part III effect of lead in ground installation", AIEE Transactions, vol. 62, pp.334-345, 1943.
- [22] E. D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", Copyright 1949 by Bell Telephone Laboratories, Incorporated.
- [23] B. G. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 2357-2362, Nov/Dec. 1980.
- [24] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp.389-399, 1983.
- [25] Y. Liu, "Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments", Dissertation, Uppsala 2004

- [26] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.2, pp. 1073-1081, October 1987.
- [27] M. Ramamoorty, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran et al., "Transient performance of grounding grids", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, pp. 2053-2059, October 1989.
- [28] A. Geri, "Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1008-1017, July 1999.
- [29] A. F. Otero, J. Cidras and J. L. del Alamo, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 873-878, July 1999.
- [30] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding system", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, November 1990.
- [31] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier, and R. Feuillet, "A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2150-2153, May 1995.
- [32] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I-single conductor and part II-ground networks", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986.
- [33] R. Andolfato, L. Bernardi and L. Fellin, "Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp.1001-1009, July 2000.
- [34] R. Verma and D. Mukhedkar, "Impulse to impedance of buried ground wires", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Sep./Oct. 1980.
- [35] C. Mazetti and G. M. Veca, "Impulse behaviour of grounding electrodes", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, pp. 3148-3156, 1983.

- [36] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou, B. C. Papadias, "Time Domain Analysis of grounding electrodes impulse response". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 517-524, April 2003.
- [37] L. D. Grcev and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system", IEEE. Trans. Power Delivery, Vol. 12, pp. 172-178, January 1997.
- [38] Y. Liu, N. Theethayi and R. Thottappillil, "An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Non uniform Transmission-Line Approach", IEEE. Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005..
- [39] C. R. Paul, "Analysis of multiconductor transmission lines", Copyright 1994 by John Wiley & Sons, Inc., chapter 5, p.60 and p.136
- [40] PC OPERA version 13.0 User Guide Manual, Vector Fields
- [41] Ηλιάνα-Λαμπρινή Μ. Κουγιουμτζή, "Προσομοίωση συστημάτων γείωσης σε πολυστρωματικό έδαφος", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002
- [42] Αμιόλα Γ. Ζάχου, "Κυκλωματική προσομοίωση συστημάτων γείωσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002
- [43] Φανή Η. Ασημακοπούλου, "Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους" Ενδιάμεση κρίση, Αθήνα 2009.
- [44] J. Ma, F. Dawalibi, and W. Daily, "Analysis of Grounding Systems in soils with Hemispherical Layering," IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 8, 1993, pp. 1773-1780.