Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης

Ι. Φ. ΓΚΟΝΟΣ

δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Καθηγητής **Ι. Α. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ** Τριμελής Επιτροπή: **Γ. Κ. ΚΟΝΤΑΞΗΣ, Ι. Α. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ, Φ. Β. ΤΟΠΑΛΗΣ** Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

1. ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Η διατριβή περιλαμβάνει την παρουσίαση της σχετικής με τα συστήματα γείωσης βιβλιογραφίας, την περιγραφή των διεξαχθέντων πειραμάτων και την επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, την κυκλωματική και πεδιακή προσέγγιση των συστημάτων γείωσης και τις διαπιστώσεις ή υποθέσεις για τον τρόπο επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων (τόσο τοπολογικών του συστήματος γείωσης, όσο και ποιοτικών του εδάφους και του εγχυομένου ρεύματος) στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση της διατριβής περιλαμβάνει την παρουσίαση της, μέχρι την υποστήριξή της (18.07.02), επιστημονικής έρευνας επί του συγκεκριμένου αντικειμένου (248 δημοσιεύσεις). Στην ανασκόπηση, που έγινε, τα άρθρα ομαδοποιούνται, ανάλογα με το περιεχόμενό τους, σε αυτά που αναφέρονται: α) στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, β) στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, γ) στην ειδική αντίσταση και την πολυστρωματική δομή του εδάφους, δ) στον ιονισμό του εδάφους και ε) στις μεθοδολογίες προσομοίωσης των συστημάτων γείωσης.

Παράγοντες που επιδρούν στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης είναι:

- η μορφή του συστήματος γείωσης,
- ειδική αντίσταση του χώματος που το περιβάλλει,
- η ὑπαρξη ἡ ὀχι ιονισμού στο ἑδαφος,
- το σημείο έγχυσης και
- η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος.

Στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, η αντίσταση των συστημάτων γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στη μόνιμη κατάσταση [1-5]. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μεταβατική κατάσταση:

- 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 «ενεργού 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.

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 εγχυόμενο ρεύμα [3, 6].

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \tag{1}$$

Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων της. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών u(t) και i(t), που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης:



Σχήμα 1: Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.

Οι σχέσεις (2) - (5) εκφράζουν τους ορισμούς των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z₁, Z₂, Z₃, Z₄ [3, 6].

$$Z_1 = \max(z(t)) \tag{2}$$

$$Z_2 = \frac{u(t_1)}{i(t_1)}$$
(3)

$$Z_{3} = \frac{u(t_{1})}{i(t_{2})}$$
(4)

$$Z_4 = \frac{u(t_2)}{i(t_2)}$$
(5)

όπου Z₁ είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα, Z₂ είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς την αντίστοιχη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, Z₃ είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και Z₄ είναι ο λόγος της τάσης, όταν το ρεύμα γίνεται μέγιστο, προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος.

Συνεπώς, ισχύει:

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$$
 (6)

Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (δηλαδή, την 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 μόνιμης κατάστασης. Η αύξηση της αντίστασης του συστήματος γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι μια μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης κατά το μεταβατικό στάδιο (π.χ. κεραυνικές εκκενώσεις) μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή στην υπό προστασία εγκατάσταση [4].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Για την ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [3], πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε υπό κλίμακα μοντέλα γειώσεων, σε πραγματικά συστήματα γείωσης, καθώς και πειράματα για τον ιονισμό του εδάφους. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων παρέχουν όχι μόνο την απαραίτητη πειραματική επιβεβαίωση των γενομένων προσομοιώσεων των συστημάτων γείωσης, αλλά και τη δυνατότητα για συσχέτιση των αποτελεσμάτων μέτρησης της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση με την κρουστική σύνθετη αντίσταση γείωσης.

3.1. Πειράματα υπό κλίμακα

Σκοπός των πειραμάτων υπό κλίμακα είναι η διερεύνηση της μεταβολής της μεταβατικής αντίστασης των πλεγμάτων γείωσης, όταν η έγχυση του κρουστικού ρεύματος γίνεται σε διαφορετικό, κάθε φορά, σημείο του πλέγματος γείωσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων [3, 7 - 9] υλοποιήθηκε η διάταξη του σχήματος 2. Για τη δημιουργία του κρουστικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια, με τιμή κορυφής ρεύματος από 0,1 έως 25kA. Η έξοδος της γεννήτριας εφαρμόζεται στο δοκίμιο (πλέγμα) και η μεταβολή της τάσεως και του ρεύματος στο δοκίμιο αυτό καταγράφεται σε ψηφιακό παλμογράφο. Συγκεκριμένα, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος καταγράφηκαν με τη χρήση του ενσωματωμένου, στη γεννήτρια, ωμικού καταμεριστή (50kΩ/50Ω), της αντίστασης μέτρησης του ρεύματος (Current shunt, 1 mΩ, 20 MHz) και παλμογράφου συχνότητας 150 MHz, με ρυθμό δειγματοληψίας 200 MS/s.



Σχήμα 2: Πειραματική διάταξη.

Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων απεικονίζονται στο σχήμα 3. Το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο μεταλλικό πλέγμα τοποθετήθηκε σε προεπιλεγμένα βάθη (2cm, 4cm, 6cm) κάτω από την επιφάνεια του νερού, στο κέντρο της γεμάτης με νερό δεξαμενής. Η έγχυση του ρεύματος έγινε σε διάφορα σημεία ξεκινώντας από τη γωνία του κάθε πλέγματος και πηγαίνοντας προς τα εσωτερικά του σημεία. Αξιοποιώντας τις συμμετρίες που υπήρχαν στα πλέγματα, δεν ελήφθησαν μετρήσεις σε όλα τα σημεία, αλλά οι δοκιμές έγιναν μόνο στα σημεία που καθορίζονται με κεφαλαία γράμματα στο σχήμα 3 [3, 8]. Σε καθένα από τα σημεία μέτρησης εφαρμόστηκαν κατ' επανάληψη κρουστικά ρεύματα διαφορετικής μέγιστης τιμής. Για τη μεταβολή της μέγιστης τιμής του εγχυόμενου ρεύματος, μεταβαλλόταν η τάση φόρτισης της γεννήτριας κρουστικού ρεύματος. Το εγχυόμενο ρεύμα έχει τη μορφή 8μs±20% / 80μs±20%.





Η πειραματική διαδικασία, που περιγράφηκε προηγουμένως, επαναλήφθηκε για όλα τα πλέγματα γείωσης του σχήματος 3, για τα επιλεγμένα σημεία έγχυσης του κρουστικού ρεύματος και για τιμές της αγωγιμότητας του νερού της δεξαμενής: 2,5 - 4,0 - 5,0 - 7,5 -10,0 mS/cm [3, 7-9]. Προέκυψε σειρά παλμογραφημάτων που έχουν μορφή ανάλογη με αυτή του σχήματος 4. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (παλμογραφήματα) ήταν διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή. Στη συνέχεια, από κάθε μία σειρά μετρήσεων υπολογίσθηκε ο μέσος όρος εκάστης των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (εξισώσεις 2-5), καθώς και η διασπορά των μετρήσεων. Αφού εξαιρέθηκαν εκείνες οι μεμονωμένες τιμές εκάστης παραμέτρου (εφ' όσον, φυσικά, υπήρχαν) που βρίσκονταν εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% υπολογίσθηκε ξανά ο μέσος όρος των μετρήσεων. Στην αριστερή στήλη του σχήματος 4 παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό παλμογράφημα. Η θετική κυματομορφή αντιστοιχεί στην καταγραφόμενη τάση, ενώ η αρνητική κυματομορφή αντιστοιχεί στο εγχυόμενο ρεύμα. Το ρεύμα δεν είναι αρνητικό, αλλά για καλύτερη απεικόνιση των παλμογραφημάτων, έχει επιλεγεί η εμφάνιση του αντιθέτου του εγχυόμενου ρεύματος, έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτο το προς μελέτη σήμα. Στη δεξιά στήλη του σχήματος 4 φαίνονται: α) η κυματομορφή της τάσεως (επάνω πράσινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη η σχέση καταμερισμού του ωμικού καταμεριστή, β) η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος (μεσαία κόκκινη καμπύλη, έχει ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης για μετατροπή της τάσης του παλμογραφήματος σε ρεύμα) και γ) η κυματομορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (κάτω μπλε καμπύλη), που προέκυψε με εφαρμογή της εξίσωσης 1.



Σχήμα 4: Πλέγμα 1, βάθος 2 cm, σημείο Α, αγωγιμότητα 2,5 mS/cm.

Στα σχήματα 5-7 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου όρου των τιμών των παραμέτρων Z₂, Z₃, Z₄ της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για όλα τα πλέγματα, για διάφορα βάθη τοποθέτησης και για ενδεικτικές τιμές της αγωγιμότητας, στις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις, συναρτήσει του σημείου έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος.



Σχήμα 5: Μεταβολή των παραμέτρων Z₂, Z₃, Z₄ του πλέγματος 1 (G4), τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητα ύδατος 5,0mS/cm.



Σχήμα 6: Μεταβολή των παραμέτρων Z₂, Z₃, Z₄ του πλέγματος 2 (G9), τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητα ύδατος 2,5mS/cm.



Σχήμα 7: Μεταβολή των παραμέτρων Z₂, Z₃, Z₄ του πλέγματος 3 (G16), τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητα ύδατος 5,0mS/cm.

3.2. Πειράματα σε πραγματικά συστήματα γείωσης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, σε πραγματικά συστήματα γείωσης [3, 10, 11], για την παραγωγή των κρουστικών ρευμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές κρουστικές γεννήτριες ρεύματος.

Η πρώτη εξ αυτών έχει δύο ακροδέκτες εξόδου. Ο ένας (ακροδέκτης υψηλής) συνδέεται στο δοκίμιο (κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ή ηλεκτρόδια), ενώ ο άλλος ακροδέκτης συνδέεται στην άπειρη γη που βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 40m. Η μεταβολή της τάσεως του συστήματος γείωσης ως προς την άπειρη γη και του εγχυόμενου στο δοκίμιο ρεύματος παρατηρούνται με τη βοήθεια ενός ψηφιακού παλμογράφου. Με τη χρήση του ενσωματωμένου, στη γεννήτρια, ωμικού καταμεριστή υποβιβάζεται η τάση και οδηγείται στο κανάλι 1 του παλμογράφου. Παράλληλα, με τη χρήση της ενσωματωμένης αντίστασης μέτρησης του ρεύματος, το εγχυόμενο ρεύμα μετατρέπεται σε τάση, για να μεταφερθεί στο κανάλι 2 του παλμογράφου και να πραγματοποιηθεί η καταγραφή του.

Η δεύτερη γεννήτρια κρουστικού ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την

συνδεσμολογία του δοκιμίου, είτε ως γεννήτρια παραγωγής κρουστικών τάσεων, είτε ως γεννήτρια παραγωγής κρουστικών ρευμάτων. Όταν λειτουργεί ως γεννήτρια παραγωγής ρεύματος δύναται να τροφοδοτεί με ρεύμα που η κορυφή του μπορεί να κυμαίνεται από 0,25 έως 3kA, ενώ η κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα είναι η . Ο ένας ακροδέκτης της γεννήτριας συνδέεται στο σύστημα γείωσης και ο άλλος στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο που προσομοιώνει την άπειρη γη. Τα σήματα που καταγράφονται είναι η τάση ανάμεσα στο άνω άκρο του ηλεκτροδίου γείωσης και την άπειρη γη, καθώς και το εγχυόμενο ρεύμα. Το σύστημα καταγραφής μέτρησης (βιομηχανικός ελεγκτής) είναι ένα σύστημα συλλογής πληροφοριών (Data Aquisition System), το οποί-ο επεξεργάζεται τις πληροφορίες που λαμβάνει στις εισόδους του και δίνει κατάλληλες εξόδους. Ο προγραμματισμός του ηλεκτρονικού υπολογιστή, που αναλαμβάνει την επικοινωνία, γίνεται συνήθως με χρήση γλωσσών ανωτέρου επιπέδου, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται χρήση της γλώσσας Assembly.

Σχήμα 8: Πειραματική διάταξη για ένα κατακό- Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη για ένα οριζόντιο ρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης. ηλεκτρόδιο γείωσης.

Η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, περιλαμβάνει την πρώτη φορητή κρουστική γεννήτρια, ενώ η διάταξη των πειραμάτων, που έγιναν στην Αθήνα (στο κηπάριο της οδού Τοσίτσα), περιλαμβάνει τη δεύτερη φορητή κρουστική γεννήτρια. Στα σχήματα 8, 9 παρουσιάζεται η χωροταξία του μετρητικού εξοπλισμού.

Στα σχήμα 10.α παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε ένα σύστημα γείωσης που αποτελείται από μία κατακόρυφη ράβδο διαμέτρου 20mm και μήκους 100cm. Η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος είναι (για λόγους απεικόνισης και μόνο) η αρνητική κυματομορφή, ενώ η διαφορά δυναμικού ως προς την άπειρη γη είναι η θετική κυματομορφή. Στο σχήμα 10.β παρουσιάζονται: α) η κυματομορφή της τάσεως (επάνω πράσινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη ο λόγος του ωμικού καταμεριστή, β) η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος (μεσαία κόκκινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης προκειμένου να μετατραπεί η τάση του πρώτου καναλιού του παλμογραφήματος σε ρεύμα και γ) η κυματομορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (κάτω μπλε καμπύλη), που προέκυψε με εφαρμογή της εξίσωσης 1. Η μορφή της κυματομορφής του ρεύματος που εγχυόταν ήταν 8/350μs±20%. Η κυματομορφή του ρεύματος σαφέστατα δεν είναι της μορφής 8/20μs που δίνουν και οι δύο κρουστικές γεννήτριες κατά το βραχυκύκλωμα σύμφωνα με την IEC 60060-1 [12, 13]. Η επίδραση του φορτίου (στην προκειμένη περίπτωση η αντίσταση του συστήματος γείωσης) της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων στη μορφή του παραγόμενου ρεύματος μελετήθηκε σε εργασία μας [14].

Το επόμενο πείραμα σκοπό είχε την καταγραφή της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης οριζοντίων ηλεκτροδίων γείωσης. Το οριζόντιο ηλεκτρόδιο, μήκους 2 ή 4m κατά περίπτωση, τοποθετήθηκε σε βάθος 60cm στο κηπάριο της Τοσίτσα. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μετρήθηκε με τη μέθοδο Wenner - τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 27.



Σχήμα 10: Μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος, της τάσης και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για μία κατακόρυφη ράβδο μήκους 1m.





Οι κυματομορφές που μελετώνται παρουσιάζονται για το ηλεκτρόδιο των 2m στο σχήμα 11, ενώ για το ηλεκτρόδιο των 4m στο σχήμα 12. Το εγχυόμενο ρεύμα (κόκκινες καμπύλες) και η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ του άκρου του ηλεκτροδίου που γίνεται η έγχυση του ρεύματος και της άπειρης γης (πράσινες καμπύλες) έχουν τη μορφή 8/70μs±20% και 7/70μs±20% αντίστοιχα. Από τη μορφή nou έχει η μεταβατική σύνθετη αντίσταση (μπλε καμπύλες) παρατηρείται ότι συγκλίνει ταχύτατα (σε λιγότερο aπό 4μs) στην τιμή της αντίστασης της μονίμου καταστάσεως [15], η οποία, όπως φαίνεται και στα σχήματα, όταν διπλασιάζουμε το μήκος του ηλεκτροδίου δεν υποδιπλασιάζεται, αλλά μειώνεται μόνο κατά 30% (κατόπιν μέτρησης με το γειωσόμετρο διαπιστώθηκε ότι από τα 19Ω μειώθηκε στα 12Ω).

3.3. Πειράματα για τον ιονισμό του εδάφους

Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, το χώμα παύει να συμπεριφέρεται ως μονωτικό και συμπεριφέρεται ως αγώγιμο [6, 16]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, αλλά και της αντίστασης του συστήματος γείωσης. Για να μελετηθεί αυτό το φαινόμενο, γίνεται προσομοίωση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το χώμα σε συνθήκες κεραυνοπληξίας.

Τα δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν κυλινδρικοί αγωγοί διαφορετικών διαμέτρων, των οποίων οι βάσεις ήταν ξύλινες, ενώ τα τοιχώματά τους μεταλλικά. Οι κύλινδροι είχαν μήκος 60cm. Στο κέντρο των κυλίνδρων τοποθετήθηκε ηλεκτρόδιο, που έφτανε μέχρι την κάτω βάση του κυλίνδρου, προεξείχε από την πάνω βάση και ήταν σταθερής διαμέτρου. Οι κύλινδροι γέμισαν όλοι με χώμα, του οποίου η ειδική αντίσταση μετρήθηκε για κάθε έναν χωριστά. Η ειδική αντίσταση του χώματος που χρησιμοποιήθηκε μεταβαλλόταν από 1.000Ωm έως 1.300Ωm. Η προσθήκη νερού στο χώμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής αντίστασης του χώματος. Με την προσθήκη ποσότητας νερού στους κυλίνδρους πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο διαφορετικές περιοχές όσον αφορά στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση το εύρος τιμών της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους ήταν μεταξύ 600Ωm και 800Ωm, ενώ στη δεύτερη από 150Ωm ἑως 200Ωm.

Για την παραγωγή κρουστικής τάσης χρησιμοποιήθηκε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, η οποία παρήγε κρουστική τάση θετικής πολικότητας. Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Οι τιμές των παθητικών στοιχείων, με τα οποία κατασκευάστηκε η γεννήτρια κρουστικών τάσεων, αλλά και οι απαραίτητες διατάξεις μέτρησης, είναι: $R_1=R_2=500$ kΩ, $R_{\mu}=140$ MΩ, $R_{L}=3,86$ kΩ, $C_1=6000$ pF, $R_1=9,5$ kΩ, $R_2=416$ Ω, $C_{\mu}=1.200$ pF, $C_{L}=485$ nF, R=75Ω. Ο μετασχηματιστής υψηλής τάσης, η μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια και το κυλινδρικό δοχείο χώματος, τοποθετήθηκαν εντός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και περικλείονταν από μεταλλικό πλέγμα. Ο παλμογράφος κρουστικών τάσεων βρισκόταν εντός κλωβού Faraday. Η τράπεζα χειρισμών και ο σταθεροποιητής τάσεως βρισκόταν εκτός του μεταλ λικού πλέγματος και κοντά στον προαναφερθέντα κλωβό.



Σχήμα 13: Πειραματική διάταξη.

Επίσης, χρειάστηκε να γίνει προσαρμογή αντιστάσεων στα άκρα των ομοαξονικών καλωδίων μεταφοράς τών προς μέτρηση σημάτων στον παλμογράφο. Έτσι, συνδέθηκε ο πυκνωτής χαμηλής τάσης του χωρητικού καταμεριστή, μέσω αντίστασης προσαρμογής Z₁=75Ω, με το ομοαξονικό καλώδιο κυματικής αντίστασης 75Ω, στο κανάλι 2 του παλμογράφου, μέσω probe 10MΩ, με λόγο υποβιβασμού 1:10. Με αυτό τον τρόπο, ο συνολικός λόγος υποβιβασμού που επιτεύχθηκε με τη χρήση του χωρητικού καταμεριστή

ήταν: $\kappa = \frac{C_L + C_H}{C_H} \cdot 10 = \frac{1.2 + 485}{1.2} \cdot 10 = 4050$.

Η πρότυπη ομοαξονική ωμική αντίσταση *R_m* συνδέθηκε μέσω ομοαξονικού καλωδίου κυματικής αντίστασης 75Ω με το κανάλι 1 του παλμογράφου. Ως αντιστάσεις μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν πρότυπες ομοαξονικές αντιστάσεις με τιμές 0,25, 0,9917, 0,5028, 0,04971Ω, αντίστοιχα. Πριν συνδεθεί το ομοαξονικό καλώδιο με τον παλμογράφο μεσολάβησε αντίσταση προσαρμογής τιμής Z2=75Ω, για να μην υπάρχουν ανακλώμενα κύματα στη διάταξη μέτρησης [13].

Στο σχήμα 14 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παλμογραφήματα, στα οποία φαίνεται η ύπαρξη ιονισμού στο χώμα. Η επάνω κυματομορφή του κάθε παλμογραφήματος (κανάλι 1) αντιστοιχεί στην κυματομορφή του ρεύματος, ενώ η κάτω κυματομορφή (κανάλι 2) αντιστοιχεί στην κυματομορφή της τάσεως. Η κυματομορφή της τάσης, εάν πολλαπλασιαστεί με το συνολικό λόγο υποβιβασμού του καταμεριστή, δίνει την τάση που επιβάλλεται στο δοκίμιο. Για την εκτίμηση (από την κυματομορφή του ρεύματος) του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο πρέπει, ευλόγως να ληφθεί υπ' όψιν η τιμή της αντίστασης μέτρησης *R_m*. Η ύπαρξη του ιονισμού διακρίνεται από την απότομη αύξηση του ρεύματος και την αντίστοιχη μείωση της τάσης. Δηλαδή, ενώ, όταν ξεκινάει η επιβολή της τάσης, το δοκίμιο έχει μία συγκεκριμένη αντίσταση, με την έναρξη του ιονισμού η αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται (γιατί υπάρχει αύξηση του ρεύματος και αντίστοιχα μείωση της τάσης). Επομένως, κατά τον ιονισμό μειώνεται η ειδική αντίσταση του χώματος.



Σχήμα 14: Χαρακτηριστικά παλμογραφήματα τάσεως και ρεύματος για τον κύλινδρο.

Στο σχήμα 15 γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί η επίδραση, σε διάφορα είδη χώματος, του λόγου των κρίσιμων εντάσεων έναρξης ιονισμού (του βρεγμένου προς το στεγνό έδαφος) συναρτήσει του λόγου των ειδικών αντιστάσεων χώματος (του βρεγμένου προς το στεγνό έδαφος). Γίνεται, επίσης, σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα του Flanagan et al. για άλλους τύπους εδάφους.

Πρέπει να αναφερθεί ότι στα πειράματα του Flanagan η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού βρεγμένου εδάφους μειώνεται έως και στο 60% της αντίστοιχης τιμής του στεγνού εδάφους, ενώ στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο η αντίστοιχη μείωση φθάνει έως στο 35%. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο στοιχείο για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους, η οποία, κατά το σκεπτικό αυτό, μπορεί να φθάσει έως την τάξη των 200kV/m.



Σχήμα 15: Μεταβολή του λόγου της έντασης έναρξης ιονισμού (βρεγμένου προς στεγνό χώμα) συναρτήσει του αντίστοιχου λόγου της ειδικής αντίστασης του χώματος.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Στη διατριβή παρουσιάζονται τρόποι προσομοίωσης (κυκλωματικής [18-21] και πεδιακής [22]) της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, καθώς και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν, με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης άλλων ερευνητών. Επίσης, παρουσιάζονται η διαδικασία και τα αποτελέσματα του υπολογισμού των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Τέλος, εφαρμόζεται μία μέθοδος προσομοίωσης Monte-Carlo [23, 24], που επιτρέπει την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης πυλώνων μιας γραμμής μεταφοράς.

4.1. Κυκλωματική προσέγγιση

Παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων του π-ισοδύναμου κυκλώματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε κάθε σύστημα γείωσης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της μεταβατικής ανύψωσης δυναμικού και της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης σε σειρά από συστήματα γείωσης (με διαφορετικές διαστάσεις, βάθος τοποθέτησης και τρόπο κατασκευής). Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε πληθώρα διαφορετικών κυματομορφών του εγχυόμενου ρεύματος προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων του ρεύματος. Επίσης, μεταβλήθηκε η ειδική αντίσταση του εδάφους για να διερευνηθεί η συμβολή της στα υπό έρευνα φαινόμενα.

Για να καταδειχθεί η αξία και η καταλληλότητα της μεθοδολογίας στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έγιναν αφενός μεν με αποτελέσματα πειραμάτων και προσομοιώσεων άλλων ερευνητών, αφετέρου δε με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της παρούσης διατριβής.

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα διεθνώς πειραματικά αποτελέσματα έχουν προκύψει από την EDF [25] και καλύπτουν αρκετά διαφορετικά συστήματα γείωσης. Τα πειραματικά αυτά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί από πλήθος ερευνητών, οι οποίοι προτείνουν διάφορους τρόπους προσομοίωσης. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών μαζί και με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας. Στο σχήμα 16.α παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα για ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο (ακτίνας 12mm, μήκους 15m, τοποθετημένο σε βάθος 0,6m από την επιφάνεια εδάφους ειδικής αντίστασης 70Ωm) [25] μαζί με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Grcev [26], ενώ στο σχήμα 16.β παρουσιάζονται τα αντίστοιχα δικά μας αποτελέσματα. Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το EMTDC [3, 20] παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις με τρία χρώματα. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στην αρχή του ηλεκτροδίου, το κόκκινο σε απόσταση 3,5m από την αρχή του ηλεκτροδίου και το πράσινο σε απόσταση 7m από την αρχή του ηλεκτροδίου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα [25]. Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, που φαίνονται στα σχήματα 16.α και 16.β, διαπιστώνεται ότι η σύγκλιση της προσομοίωσης που προτείνεται είναι καλύτερη από την αντίστοιχη του Grcev [26].



Σχήμα 16: (a) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grcev [26], (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για οριζόντιο ηλεκτρόδιο.

Στο σχήμα 17.α παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα για μία κατακόρυφη ράβδο (ακτίνας 16mm, μήκους 6m, τοποθετημένης σε έδαφος ειδικής αντίστασης 50Ωm) [25] μαζί με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Grcev [26], ενώ στο σχήμα 17.β τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το PSCAD/EMTDC [3]. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας βρίσκεται πλησιέστερα στα πειραματικά αποτελέσματα [25].



Σχήμα 17: (a) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grcev [26], (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για κατακόρυφη ράβδο.

Στο σχήμα 18.α παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Grcev και Heimbach [27], για τετράγωνα πλέγματα (με μήκος πλευράς 10, 20, 30 και 40m) τοποθετημένα σε βάθος 0,5m σε έδαφος ειδικής αντίστασης 100Ωm. Στο σχήμα 18.β παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με χρήση του PSCAD/EMTDC [3, 21]. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων, ενώ, επιπλέον, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας μέσω προσομοίωσης με το PSCAD/EMTDC είναι σαφέστατα απλούστερη από τη μεθοδολογία των άλλων [27].



Σχήμα 18: (a) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grcev [27], (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για πλέγματα γείωσης.

Στο σχήμα 19 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) που παρουσιάστηκαν για οριζόντια ηλεκτρόδια με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) με το PSCAD/EMTDC, με πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ τους. Αντίστοιχα, στο σχήμα 20 για την περίπτωση της κατακόρυφης ράβδου τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) που παρουσιάστηκαν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) με το PSCAD/EMTDC με πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσά τους



Σχήμα 19: Σύγκριση πειραματικών αποτελε- Σχήμα 20: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για σμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για την τάση που αναπτύσσεται σε οριζόντιο ηλε- την τάση που αναπτύσσεται σε κατακόρυφη κτρόδιο μήκους 2m.

ράβδο μήκους 1m.

Τέλος, στο σχήμα 21 συγκρίνονται, για την περίπτωση των πλεγμάτων υπό κλίμακα,

τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

(πράσινη καμπύλη), οπότε και διαπιστώνεται ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ αυτών [3].



Σχήμα 21: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων (κόκκινη καμπύλη) και αποτελεσμάτων προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) για την τάση που αναπτύσσεται στα πλέγματα (α) G4 (β) G9.

4.2. Πεδιακή προσέγγιση

Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου PC Opera προσομοιώθηκαν διάφορες διατάξεις εδάφους πολυστρωματικής δομής [3, 22] και μελετήθηκε η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Ως το πλέον χαρακτηριστικό πρόβλημα εξετάζεται η περiπτωση μίας κατακόρυφης ράβδου τοποθετημένη σε πενταστρωματικό έδαφος. Τα πάχη των στρωμάτων είναι αντίστοιχα 5m, 10m, 20m, 40m και άπειρο. Το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα, οπότε αρκεί η σχεδίαση του μοντέλου στο ένα ημιεπίπεδο. Η γεωμετρία του προβλήματος και το χρησιμοποιούμενο κατά την επίλυση πλέγμα παρουσιάζονται στο σχήμα 22. Έγινε σειρά προσομοιώσεων στο πρόγραμμα PC Opera και συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές καμπύλες των Takahashi και Kawase [28, 29] για πολυστρωματικό έδαφος, αλλά και με τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες για μονοστρωματικό και διστρωματικό έδαφος [1-3].



Σχήμα 22: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος.

Μεταβάλλοντας τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων μελετήθηκαν διάφορες διατάξεις. Τα αποτελέσματα για την κατανομή δυναμικού που εξάγονται από τη σχετική ανάλυση, για δύο από τις εξεταζόμενες διατάξεις δίνονται στο σχήμα 23.



 $\begin{array}{c} \rho_{1} = 10 \ \Omega m, \ \rho_{2} = 50 \ \Omega m, \ \rho_{3} = 100 \ \Omega m, \\ \rho_{4} = 500 \ \Omega m, \ \rho_{5} = 1000 \ \Omega m \end{array}$

 $\begin{array}{c} \rho_{_1}{=}1000 \; \Omega m, \; \rho_{_2}{=}500 \; \Omega m, \; \rho_{_3}{=}100 \; \Omega m, \\ \rho_{_4}{=}50 \; \Omega m, \; \rho_{_5}{=}10 \; \Omega m \end{array}$

Σχήμα 23: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο.

•: θεωρητική ανάλυση Takahashi – Kawase [28, 29], •: διστρωματική μέθοδος [1],

•: προσομοίωση με PC Opera, •: μονοστρωματικό έδαφος [1].

Παρατηρείται ότι οι κυματομορφές του δυναμικού που προκύπτουν με τη χρήση του PC Opera προσεγγίζουν τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσέγγιση των Takahashi και Kawase [28, 29] για πολυστρωματικό έδαφος. Το πλεονέκτημα που έχει η χρήση του προγράμματος είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε περίπτωση συστήματος γείωσης, ενώ η προσέγγιση των Takahashi και Kawase περιορίζεται είτε σε σημειακά ηλεκτρόδια, είτε σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια. Ο υπολογισμός του δυναμικού στην επιφάνεια εδάφους θεωρώντας είτε μονοστρωματική, είτε διστρωματική διαμόρφωση, προκαλεί, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των εξεταζόμενων περιπτώσεων, αφού εξετάζονται πολυστρωματικές δομές εδάφους. Άρα το PC Opera μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο αρωγό στην προσομοίωση του αναπτυσσόμενου δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, όπου είναι τοποθετημένο το σύστημα γείωσης.

4.3. Ειδική αντίσταση του εδάφους

Κατόπιν πληθώρας μετρήσεων [30] προέκυψε ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και βάθος του κάθε στρώματος του εδάφους). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική [31-33] και τριστρωματική δομή [34, 35] του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης πρέπει να είναι η αποδοτικότερη δυνατή, ώστε αφενός να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις ήδη υφιστάμενες για διστρωματικό και τριστρωματικό έδαφος [30-35] και αφετέρου να μπορεί εύκολα και αποδοτικά να χρησιμοποιηθεί και για πολυστρωματικά εδάφη. Στα πλαίσια της παρούσης διατριβής αναπτύχθηκε σε Matlab και C++ ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος παρέχει άριστα αποτελέσματα και σε όλα τα άλλα προβλήματα ελαχιστοποίησης που εφαρμόστηκε [36-39], όπως προβλήματα που αφορούσαν πολυδιάστατα συστήματα [36-38], ρύπανση μονωτήρων [39] αλλά και τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Η λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε σε Matlab και C++, περιγράφεται με το λογικό διάγραμμα του σχήματος 24 [3].



Σχήμα 24: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Κατ' αρχήν και χάριν απλότητας, παρουσιάζεται ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους, που είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων (ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους, ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους και h_1 το βάθος του πάνω στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_a :

$$F_g = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| \rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c \right|}{\rho_{ai}^m}$$
(7)

όπου P_{ai}^{m} είναι η *i*-οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με *a*, ενώ P_{ai}^{c} είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με *a* που αντιστοιχεί στο *i*-οστό ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (8) [30-32]:

$$\rho_{a}^{c} = \rho_{1} \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_{n} \left(\frac{\rho_{2} - \rho_{1}}{\rho_{2} + \rho_{1}} \right)^{n} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_{1}}{a}\right)^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_{1}}{a}\right)^{2}}} \right) \right)$$
(8)

о́по∪ *n* = 1...∞

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Wenner [30]. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν σε μία νοητή ευθεία γραμμή και σε βάθος 40cm. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν προκειμένου να καταγραφούν η δομή του εδάφους και οι ανομοιογένειες που υπήρχαν σε αυτό. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων ήταν α και μεταβαλλόταν με διακριτά βήματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν (πειραματικά, αλλά και με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου), για δύο διαφορετικές θέσεις, φαίνονται στο σχήμα 25.



Σχήμα 25: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των βοηθητικών ηλεκτροδίων (Μάιος 2002).

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων του οποιουδήποτε πολυστρωματικού εδάφους. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του Ν-στρωματικού εδάφους ανάγεται, με την ίδια λογική, σε πρόβλημα βελτιστοποίησης (2· N-1) παραμέτρων (των ειδικών αντιστάσεων των Ν στρωμάτων του εδάφους και του βάθους των N-1 ανωτέρων στρωμάτων, ενώ το Nοστό και τελευταίο στρώμα θεωρείται ότι έχει άπειρο βάθος). Και στην περίπτωση αυτή, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση (7) μόνο που τώρα έχει (2· N-1) παραμέτρους, ενώ το που είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με α και αντιστοιχεί στο *i*-οστό ζεύγος μετρήσεων, δίνεται από τη σχέση [28, 29]:

$$\rho_{\alpha}^{c} = \rho_{1} \cdot [1 + 2 \cdot F_{N}(a) - F_{N}(2 \cdot a)]$$
(9)

όπου η συνάρτηση *FN*^(x) υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (10) [28, 29].

$$F_N(x) = 2 \cdot x \cdot \int_0^\infty \frac{K_{N1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}}{1 - K_{N1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}} J_o(\lambda \cdot x) \cdot \partial\lambda$$
(10)

каі

$$K_{N1} = \frac{k_{1} + K_{N2} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{2}}}{1 + k_{1} \cdot K_{N2} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{3}}}$$

$$K_{N2} = \frac{k_{1} + K_{N3} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{3}}}{1 + k_{1} \cdot K_{N3} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{3}}}$$

$$\dots K_{NS} = \frac{k_{S} + K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}}{1 + k_{S} \cdot K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}}$$

$$K_{NN-2} = \frac{k_{N-2} + K_{NN-1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{N-1}}}{1 + k_{N-21} \cdot K_{NN-1} e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{N-1}}}$$

$$K_{NN-1} = k_{N-1}$$
(11)

Επιπρόσθετα, για 1<*i*<*N*-1 οι συντελεστές ανάκλασης μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων του εδάφους δίνονται από τη σχέση:

$$k_{i} = \frac{\rho_{i+1} - \rho_{i}}{\rho_{i+1} + \rho_{i}}$$
(12)

όπου ρ_i η ειδική αντίσταση του *i*-οστού στρώματος του εδάφους.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν (πειραματικά, αλλά και με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου), για τριστρωματικό έδαφος, παρουσιάζονται στο σχήμα 26 (μετρήσεις: ο, υπολογισμοί: συνεχής γραμμή). Η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους και η καταγραφή της μεταβολής της μέσα στο χρονικό διάστημα ενός έτους για δύο διαφορετικούς χώρους φαίνονται στο σχήμα 27.



Σχήμα 26: Μετρήσεις τριστρωματικού εδάφους.



Σχήμα 27: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε δύο διαφορετικά εδάφη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν και αναδεικνύουν τη συμβολή της παρούσης διδακτορικής διατριβής στην έρευνα της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης είναι:

- Σε κάθε περίπτωση, που πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα γείωσης, είναι απαραίτητη η γνώση της δομής του εδάφους, αφού η χωροθέτηση του συστήματος είναι δεδομένη (καθορίζεται από την εγκατάσταση που αυτό προστατεύει). Τα χαρακτηριστικά της δομής του εδάφους αποτελούν απαραίτητα δεδομένα για τις κυκλωματικές ή πεδιακές προσομοιώσεις των συστημάτων γείωσης. Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που διεξήχθησαν, έδειξαν ότι το έδαφος πρέπει να προσομοιώνεται ως διστρωματικό, τουλάχιστον. Επίσης, έγινε φανερό ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ο υπολογισμός των παραμέτρων της δομής του πολυστρωματικού εδάφους μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης: στα πλαίσια της διατριβής αυτής προτάθηκε μεθοδολογία, με εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου, μέσω της οποίας, με χρήση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, υπολογίζονται οι παράμετροι της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής, αποδεικνύεται, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Από τη σύγκριση διαπιστώθηκε ότι, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους, έδωσε ακριβέστερα αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνουν οι μέχρι τώρα υφιστάμενες μέθοδοι. Επομένως, με την προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι δυνατόν να υπολογισθούν με μεγάλη ακρίβεια οι παράμετροι του πολυστρωματικού εδάφους, οι οποίες στη συνέχεια, θα αποτελέσουν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης, που θα εγκατασταθεί στο συγκεκριμένο έδαφος.
- Προκειμένου να είναι δυνατή η κυκλωματική προσομοίωση κάθε συστήματος γείωσης,
 υλοποιήθηκε μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων του π-ισοδύναμου
 κυκλώματος. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόσθηκε για τον υπολογισμό της μεταβατικής

ανύψωσης δυναμικού και της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης, σε διάφορα συστήματα γείωσης. Η ανάγκη να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων του προβλήματος οδήγησε, αφενός μεν, στη χρήση πολλών διαφορετικών κυματομορφών του εγχυόμενου ρεύματος, ώστε να καταστεί εμφανής η επίδραση των παραμέτρων του ρεύματος, αφετέρου δε, στη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ώστε να διερευνηθεί η συμβολή της ποιότητας του εδάφους στα υπό έρευνα μεγέθη. Η αξία και η καταλληλότητα της μεθοδολογίας αποδείχθηκε, επιβεβαιώθηκε δε η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κυκλωματικής προσομοίωσης, με χρήση του ΕΜΤDC, που προέκυψαν ακολουθώντας τη νέα μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων των π-ισοδυνάμων κυκλωμάτων με α) πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής και β) αποτελέσματα πειραμάτων και προσομοίωσης άλλων ερευνητών.

- Η πεδιακή προσομοίωση έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου PC Opera. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, επιτρέπει, με δεδομένη τη δομή του εδάφους, να πραγματοποιηθεί αποδοτική προσομοίωση του συστήματος και ακριβής υπολογισμός του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Το πλεονέκτημα που έχει η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε σύστημα γείωσης, ενώ η χρήση των εξισώσεων της πολυστρωματικής ανάλυσης περιορίζεται είτε σε σημειακά, είτε σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια. Για να εκτιμηθεί η αξία της προσομοίωσης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης, που προέκυψαν από τη χρήση του PC Opera, με αποτελέσματα άλλων μεθοδολογιών, από την οποία προκύπτει ότι το PC Opera μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο αρωγό στοιχείο στην προσομοίωση συστημάτων γείωσης και στον ακριβή υπολογισμό του αναπτυσούμενου δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα γείωσης.
- Στα πειράματα, που έγιναν για τη μελέτη του ιονισμού του εδάφους, για διάφορα είδη χώματος και επίπεδα αγωγιμότητάς του, μελετήθηκε η μεταβολή του λόγου των κρίσιμων εντάσεων έναρξης ιονισμού συναρτήσει του λόγου των ειδικών αντιστάσεων (βρεγμένου/στεγνού εδάφους). Παρατηρείται ότι ο ρυθμός μείωσης του λόγου των

κρίσιμων εντάσεων ιονισμού είναι ουσιαστικός μεν, όπως ἀλλωστε αναμένεται, αλλά μικρότερος από το ρυθμό μείωσης του λόγου των ειδικών αντιστάσεων του χώματος. Έγινε, επίσης, σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα ἀλλων ερευνητών, για διαφορετικούς τύπους εδαφών, τα δε αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής υπήρξαν ικανοποιητικά: διαπιστώθηκε ότι η κρίσιμη ἐνταση ἐναρξης ιονισμού σε βρεγμένο ἐδαφος μειώνεται ἐως και στο 35% της αντίστοιχης τιμής για το στεγνό ἐδαφος. Η πλειοψηφία των τιμών της ἑντασης ιονισμού για διαφορετικά είδη χώματος βρίσκεται στο διάστημα από 600kV/m ἑως 1.000kV/m. Το ίδιο εύρος τιμών χρησιμοποίησαν ἀλλοις ερευνητές, μαζί με την υπόθεση ότι στο βρεγμένο ἑδαφος η κρίσιμη ἐνταση ἐναρξης ιονισμού μειώνεται στο μισό της αντίστοιχης τιμής του στεγνού εδάφους, εκτιμώντας, ἑτσι, ότι η κρίσιμη ἐνταση ιονισμού είναι της τάξεως των 300kV/m. Η διαπίστωση, που ἑγινε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας (περί μειώσεως στο 35%, δηλαδή σε τιμές της τάξεως των 200kV/m), μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα χρήσιμο στοιχείο για την οικονομικότερη διαστασιοποίηση συστημάτων γείωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tagg G.F., "Earth Resistances", George Newnes Limited, London, 1964.
- [2] Sunde E.D., "Earth Conduction Effects in Transmission Systems", Dover Publications, New York, 1968.
- [3] Γκόνος Ι.Φ., «Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυεχνείο, Αθήνα, 2002.
- [4] Verma R., Mukhedkar D., "Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids", IEEE Transaction on Apparatus and Systems, PAS 100, 3, March 1981, pp. 1023-1030.
- [5] Kosztaluk R., Loboda M., Mukhedkar D., "Experimental study of transient ground impedances", IEEE Transaction on Apparatus and Systems, PAS100, 11, November 1981, pp. 4653-4660.
- [6] Liew A.C., Darveniza M., "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", IEE Proceeding, 121, 2, February 1974, pp. 123-135.
- [7] Γκόνος Ι.Φ., Τοπαλής Φ.Β., Σταθόπουλος Ι.Α., «Πειραματική μελέτη της μεταβατικής

συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης», Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα 11-12 Απριλίου 2002, σελ.67-74.

- [8] Γκόνος Ι.Φ., Τοπαλής Φ.Β., Σταθόπουλος Ι.Α., «Μοντελοποίηση Συστημάτων Γείωσης- Πειράματα υπό Κλίμακα», Μηνιαία Τεχνική Επιθεώρηση, Τεύχος 1317, Μάρτιος 2003, σελ. 32-3.
- [9] Gonos I.F., Stathopulos I.A., Topalis F.V., "Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, August 19-24, 2001, Session 3, Topic 2: Lightning: Direct, Modelling and Protection, Vol. 1, paper No. 2-16.
- [10] Gonos I.F., Antoniou M.K., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Behaviour of a Grounding System Under Impulse Lightning Current", Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on Optimisation of Electrical and Electronic Equipment's (OPTIM '98), Brasov, Romania, May 14 - 15, 1998, pp. 171-174.
- [11] Gonos I.F., Topalis F.V, Stathopulos I.A., "*Transient Impedance of Grounding Rods"*, Proceedings of the 11th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 99) Oral Session S15, Lightning, protection against strikes, earthing (d) earthing, London, UK, August 23-27, 1999, Vol. 2, pp. 272-275.
- [12] IEC 60060-1, "High voltage test techniques Part I: General definitions and test requirements", November 1989.
- [13] IEC 60060-2, "High voltage test techniques Part II: Measuring systems", November 1994.
- [14] Gonos I.F., Leontidis N., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Analysis and Design of Impulse Current Generators", WSEAS Transactions on Circuits, 1, Issue 1, pp.38-43.
- [15] IEEE Std 80-2000, "IEEE guide for safety in AC substation grounding", 2000.
- [16] Mousa A.M., "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, 9, 3, July 1994, pp. 1669-1677.
- [17] Flanagan T.M., Mallon C.E., Denson R., Smith I., "Electrical breakdown characteristics

of soil", IEEE Transaction on Nuclear Science, NS-29, 6, December 1982, pp. 1887-1890.

- [18] Suflis S.A., Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Transient Behaviour of a Horizontal Grounding Rod Under Impulse Current", Recent Advances in Circuit and Systems, Word Scientific, Singapore, 1998, pp. 61-64.
- [19] Gonos I.F., Antoniou M.K., Stathopulos I.A., Topalis F.V., "Transient Analysis of the Behaviour of Grounding Systems consisted by driven rod", Progress in Simulation, Modelling, Analysis and Synthesis of Modern Electrical and Electronic Devices and Systems, Word Scientific and Engineering Society, Athens, 1999, pp. 130-135.
- [20] Gonos I.F., Kontargyri V.T., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Transient behaviour of a horizontal grounding electrode under impulse current", Proceedings of the 13th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2003), P.05 - Transients and EMC, Delft, The Nederland, August 25-29, 2003, (P.05.45).
- [21] Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopulos I.A., Topalis F.V., "Transient behaviour of a horizontal grounding grid under impulse current", Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2002), Session T9: Grounding analysis and measurements, November 4-6, 2002, Athens.
- [22] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Influence of the Soil Non-uniformity to the Potential Distribution around a driven rod", Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, Word Scientific and Engineering Society, 2001, pp. 94-98.
- [23] Gonos I.F., Ekonomou L., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "Probability of Backflashover in Transmission Lines due to Lightning Strokes", Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 25, No. 2, February 2003, pp. 107-111.
- [24] Ekonomou L., Gonos I.F., Stathopulos I.A., Dialynas E.N., "A Backflashover Model for Calculating the Transmission Lines' Lightning Performance", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, August 19-24, 2001, Session 3, Topic 2: Lightning: Direct, Modelling and

Protection, Vol. 1, paper No. 2-6.

- [25] Rochereau H., "Response of earth electrodes when fast fronted currents are flowing out", EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, serie B, 2, 1988, pp. 13-22.
- [26] Grcev L., "Computer analysis of transient voltages in large grounding systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 2, April 1996, pp. 815-823.
- [27] Grcev L., Heimbach M., "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 12, 1, January 1997, pp. 172-178.
- [28] Takahashi T., Kawase T., "*Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure*", IEEE Transactions on Power Delivery, 5, 2, April 1990, pp. 604-612.
- [29] Takahashi T., Kawase T., "Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure", IEEE Transactions on Power Delivery, 6, 2, April 1991, pp. 608-614.
- [30] IEEE Std 81-1983, "*IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system*", 11 March 1983.
- [31] Del Alamo J.L., "A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth", IEEE Transactions on Power Delivery, 8, 4, October 1993, pp. 1890-1899.
- [32] Seedher H.R., Arora J.K., "Estimation of two layer soil parameters using finite wenner resistivity expressions", IEEE Transactions on Power Delivery, 7, 3, July 1992, pp. 1213-1217.
- [33] Meliopoulos A.P., Papalexopoulos A.D., "Interpretation of soil resistivity measurements: Experience with the model SOMIP", IEEE Transactions on Power Delivery, 1, 4, October 1986, pp. 142-151.
- [34] Lagace P.J., Fortin J., Crainic E.D., "Interpretation of resistivity sounding measurements in N-layer soil using electrostatics images", IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 3, July 1996, pp. 1349-1354.
- [35] Yang H., Yuan J., Zong W., "Determination of three-layer earth model from wenner

four-probe test data", IEEE Transactions on Magnetics, 37, 5, September 2001, pp. 3684-3687.

- [36] Gonos I.F., Mastorakis N.E., Swamy M.N.S., "A Genetic Algorithm Approach to the Problem of Factorization of General Multidimensional Polynomials", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Part I, 50, 1, January 2003, pp. 16-22.
- [37] Mastorakis N.E., Gonos I.F., Swamy M.N.S.: "Design of 2-Dimensional Recursive Filters using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Part I, Vol. 50, No. 5, May 2003, pp. 634-639.
- [38] Mastorakis N.E., Gonos I.F., Swamy M.N.S., "Stability of Multidimensional Systems using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I, Vol. 50, No. 7, July 2003, pp. 962-965.
- [39] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopulos I.A., "A genetic algorithm approach to the modelling of polluted insulators", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 149, 3, May 2002, pp. 373-376.