



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ
ΣΟΛΩΜΟΥ 56, 10682 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ.: 0103803343, 0105192136 FAX: 0105192324
COMITE NATIONAL HELLENIQUE
56, RUE SOLOMOU, 10682 ATHENES, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324
GREEK NATIONAL COMMITTEE
56, SOLOMOUN STR., 10682 ATHENS, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

ΣΥΝΟΔΟΣ “ΑΘΗΝΑ 2003” ΑΘΗΝΑ 27 & 28 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2003

ΠΕΔΙΑΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

I.Φ. Γκόνος¹ B.Θ. Κονταργύρη¹ I.A. Σταθόπουλος¹ A. M. Michaelides² C.P. Riley²
ΕΜΠ ΕΜΠ ΕΜΠ Vector Fields Ltd, U.K.

Η επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί είτε με αναλυτικές μεθόδους, είτε με αριθμητικές. Οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν ταχύτατη επίλυση και ακριβή αποτελέσματα, αλλά η εφαρμογή τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε μη γραμμικά υλικά, με αποτέλεσμα πολλά προβλήματα υψηλών τάσεων να μην είναι δυνατό να επιλυθούν με αυτές. Οι αριθμητικές μέθοδοι και ιδιαίτερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να εφαρμοστούν για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Πρέπει, όμως, σε πολύπλοκα μη γραμμικά προβλήματα να δίνεται η δέουσα προσοχή κατά την κατασκευή του ισοδύναμου μοντέλου του προβλήματος. Οι περιορισμοί που υπεισέρχονται κατά την μοντελοποίηση μεγάλων ηλεκτρικών συστημάτων (π.χ. γειώσεις υποσταθμών υψηλής τάσης) μειώνονται με την εξέλιξη των υπολογιστών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Vector Fields, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση τόσο δισδιάστατων, όσο και τρισδιάστατων προβλημάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται σε συστήματα γειώσεως, μονωτήρες, καλώδια μέσης και υψηλής τάσης, μετασχηματιστές κ.α..

FIELD SOLUTION OF ELECTROMAGNETIC PROBLEMS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

I.F. Gonos¹ V.T. Kontargyri¹ I.A. Stathopoulos¹ A. M. Michaelides² C.P. Riley²
NTUA NTUA NTUA Vector Fields Ltd, U.K.

The solution of electromagnetic problems can be realised with analytic or numerical methods. Analytic methods provide quick and relatively accurate solutions provided that the modelled geometries are not complicated and that materials have linear magnetic and electric properties. These restrictions however, render analytic methods unusable for a large number of problems in high power engineering. Numerical methods, and most notably Finite Element Analysis, are well suited for the solution of these classes of problems. Finite Element Analysis can return accurate solutions to non-linear problems involving complex geometries, provided that due care is taken when preparing the Finite Element model. Limitations exist in the size of the problem that can be defined, though the advent of computer technology continually pushes the boundaries further. In the present work the OPERA software from Vector Fields is employed for the solution of high voltage engineering problems in 2 and 3 dimensions. Characteristic examples of applications are presented in this paper, including grounding systems, insulators, cable terminations and transformers.

¹ Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Τηλ. 2107723582, Φάξ 2107723504, email: igoanos@ieee.org, vkont@power.ece.ntua.gr, stathop@power.ece.ntua.gr

² Vector Fields Ltd., 24 Bankside, Kidlington, Oxford OX5 1JE, U.K., Tel. +44 1865 854932, Fax.+44 1865 370277, email: Alex.Michaelides@vectorfields.co.uk.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί είτε με αναλυτικές μεθόδους, είτε με αριθμητικές. Οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν ταχύτερη επίλυση και ακριβή αποτελέσματα, αλλά η εφαρμογή τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε μη γραμμικά υλικά, με αποτέλεσμα πολλά προβλήματα υψηλών τάσεων να μην είναι δυνατό να επιλυθούν με αυτές. Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα προβλήματα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον καθορισμό του πλέγματος του προβλήματος για να περιορίζονται οι ανακρίβειες στις λύσεις. Βέβαια, πάντα υπεισέρχονται περιορισμοί κατά την μοντελοποίηση μεγάλων ηλεκτρικών συστημάτων (π.χ. γειώσεις υποσταθμών υψηλής τάσης). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Vector Fields, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση τόσο δισδιάστατων, όσο και τρισδιάστατων προβλημάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται σε συστήματα γειώσεως, μονωτήρες, καλώδια μέσης και υψηλής τάσης, μετασχηματιστές, κ.α..

Το λογισμικό πακέτο OPERA είναι ένα σύνολο προγραμμάτων ανάλυσης δισδιάστατων και τρισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της απαίτησης πολλών πληροφοριών πριν γίνει η ανάλυση, η εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό αμφίδρομο προ-επεξεργαστή. Το φυσικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες. Χρησιμοποιώντας τη γραφική αμφίδρομη διαδικασία στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας, η προς μοντελοποίηση επιφάνεια/χώρος διαιρείται σε μια συνεχή ομάδα τριγωνικών/τετραεδρικών στοιχείων. Όταν ετοιμαστεί το μοντέλο, η λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο τύπο ανάλυσης. Το πρόγραμμα ανάλυσης υπολογίζει τη σωστή λύση, περιλαμβάνοντας μη γραμμικά φαινόμενα αν αυτά έχουν μοντελοποιηθεί. Το αποτέλεσμα τότε μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας έναν “έξυπνο και ευέλικτο” μετ-επεξεργαστή. Τα αριθμητικά σφάλματα, λόγω του κακού προσδιορισμού του πλέγματος, αναλύονται και αυτά ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί και να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επισημαίνεται ότι ένας μεγάλος αριθμός τρισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων μπορούν να αναπαρασταθούν όχι μόνο από τρισδιάστατα μοντέλα, αλλά και από δισδιάστατα μοντέλα και να επιλυθούν με το OPERA-2d. Αυτό προϋποθέτει ότι η διάταξη παρουσιάζει είτε συμμετρία εκ περιστροφής, είτε εμφανίζει μεγάλο μήκος σε μια διεύθυνση, με ομοιόμορφη εγκάρσια διατομή στο μεγαλύτερο μήκος.

Το OPERA έχει ενσωματωμένους διάφορους επιλύτες, οι οποίοι επιλύουν στατικά, χρονομεταβλητά ή μεταβατικά προβλήματα μοντέλων που αποτελούνται από μονωτικά, αγωγικά ή διηλεκτρικά υλικά. Μερικοί από τους επιλύτες περιγράφονται στη συνέχεια:

- Ηλεκτροστατικός επιλύτης (electrostatic solver). Κατά την ανάλυση του μοντέλου υλοποιούνται αυτόματα δύο βήματα επίλυσης. Τα βήματα αυτά εκτελούνται εσωτερικά, ώστε να μην είναι ορατά στο χρήστη, ο οποίος σε κάθε περίπτωση εισάγει απλά τα πραγματικά δεδομένα/χαρακτηριστικά των υλικών. Κάθε βήμα επίλυσης αναφέρεται μόνο σε ένα τύπο υλικού (αγωγικό ή μονωτικό), ενώ τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος επίλυσης χρησιμοποιούνται στο δεύτερο βήμα επίλυσης, στο οποίο αξιοποιούνται και οι συνοριακές συνθήκες. Το πρόγραμμα λύνει την ηλεκτροστατική εξίσωση:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho \quad (1)$$

Επιπρόσθετα αποφασίζει αν θα επιλύσει την εξίσωση ροής ρεύματος, ελέγχοντας αν το μοντέλο περιέχει κάποιο υλικό, στο οποίο η αγωγιμότητα σ έχει μη μηδενική τιμή:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (2)$$

- Μαγνητικοστατικός επιλύτης (magnetostatic solver). Στα δισδιάστατα μαγνητικοστατικά προβλήματα επιλύεται η εξίσωση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}_z \right) = -\mathbf{J}_s \quad (3)$$

όπου \mathbf{A} είναι το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό και \mathbf{J}_s είναι η πυκνότητα ρεύματος της πηγής.

- Ηλεκτρικός επιλύτης μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (steady state ac solver). Σε χρονομεταβλητά προβλήματα, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι αλληλένδετα και επιλύονται ταυτόχρονα. Υποθέτοντας ότι τα επαγωγικά φαινόμενα είναι αμελητέα σε διηλεκτρικά προβλήματα ημιαγωγών, το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση:

$$\nabla \cdot \epsilon_c \nabla V = 0 \quad (4)$$

όπου

$$\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (5)$$

Στο πρόγραμμα περιλαμβάνονται ειδικές ρουτίνες, οι οποίες αναπτύχθηκαν για να επιλύουν προβλήματα που συμπεριλαμβάνουν σύνθετη επιτρεπτότητα και συνεπώς σύνθετο βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό. Επισημαίνεται ότι η επίλυση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τείνει στη στατική επίλυση στην περίπτωση που η αγωγιμότητα τείνει στο μηδέν.

- **Μαγνητικός επιλύτης μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (time-varying magnetic field solver).** Στην περίπτωση αυτή το δυναμικό και η πυκνότητα ρεύματος έχουν τη μορφή μιγαδικών συναρτήσεων ημιτονοειδώς μεταβαλλομένων με το χρόνο ($A_c e^{i\omega t}$, $J_c e^{i\omega t}$) και εισάγονται στην παρακάτω εξίσωση:

$$-\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla A_c = J_s - i\omega \sigma A_c \quad (6)$$

- **Μεταβατικός επιλύτης (transient solver).** Στα ηλεκτρικά προβλήματα, το πρόγραμμα αμελεί τα επαγωγικά φαινόμενα οδηγώντας σε ένα ημιστατικό ηλεκτρικό μοντέλο, όπως ακριβώς συμβαίνει και στον επιλύτη μόνιμης κατάστασης, ενώ στη συνέχεια επιλύονται οι εξισώσεις που αφορούν την μεταβατική ανάλυση:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V(P, t) + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \nabla V(P, t))) = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V(P, 0)) = 0 \quad (8)$$

όπου P είναι οι χωρικές συντεταγμένες και t ο χρόνος.

Ο συγκεκριμένος επιλύτης χρησιμοποιείται επιπλέον για μεταβατικά μαγνητικά προβλήματα, στα οποία τα ρεύματα και οι τάσεις μεταβάλλονται με το χρόνο με προκαθορισμένο τρόπο. Επιλύεται η εξίσωση διάχυσης θεωρώντας ως άγνωστη μεταβλητή το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A - H_c \right) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (9)$$

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

Το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία 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 [3-5] και τριστρωματική δομή [6] του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [7] αναπτύχθηκε σε Matlab και C++ ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος παρέχει άριστα αποτελέσματα και σε όλα τα άλλα προβλήματα ελαχιστοποίησης που εφαρμόστηκε [7-10], όπως προβλήματα που αφορούσαν πολυδιάστατα συστήματα [8-10], μονωτήρες [11, 12] αλλά και τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους [7, 13].

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους, 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_g [3, 7]:

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (10)$$

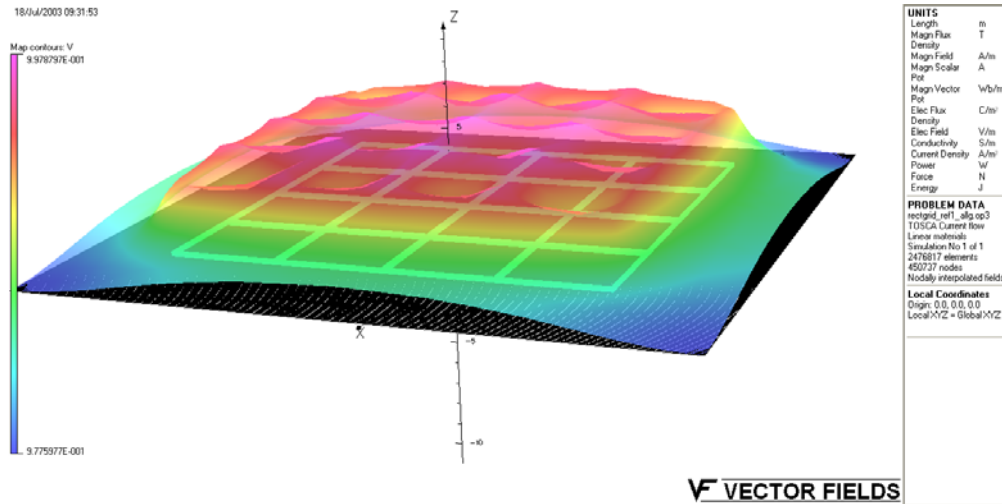
όπου ρ_{ai}^m είναι η i -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner [3] για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a , ενώ ρ_{ai}^c είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a που αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (11) [3-5, 7]:

$$\rho_a^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_n \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)^n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2}} \right) \right) \quad (11)$$

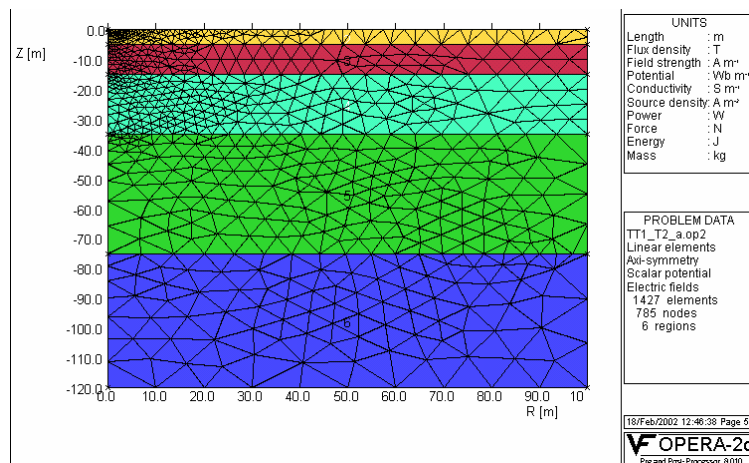
όπου $n = 1 \dots \infty$

Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου PC Opera προσομοιώθηκαν διάφορες διατάξεις εδάφους πολυστρωματικής δομής [7, 14] και μελετήθηκε η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους.

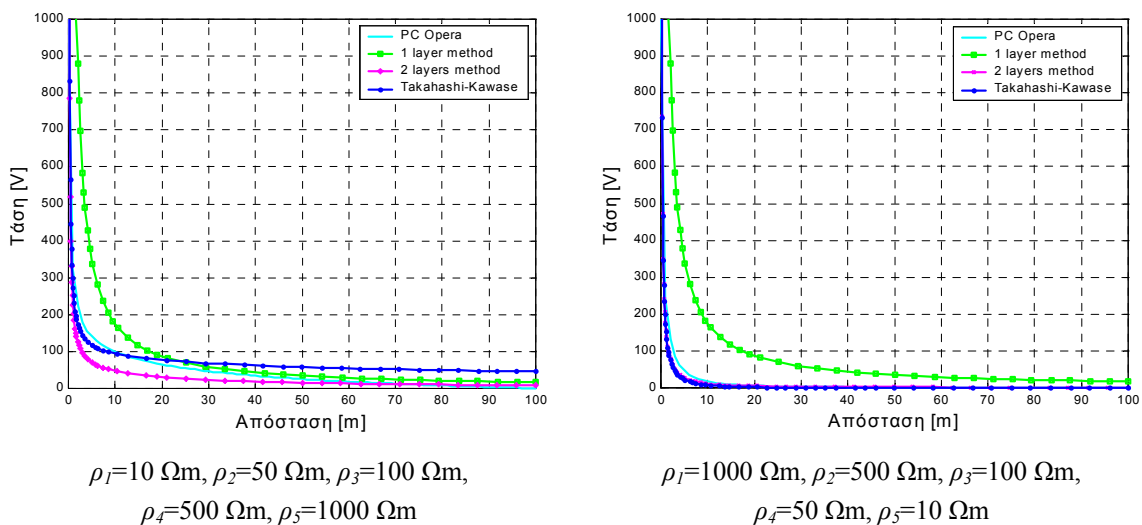
Στο πρώτο παράδειγμα εξετάζεται ένα σύστημα γείωσης που αποτελείται από ένα πλέγμα 16 τετραγώνων τοποθετημένο σε βάθος 0.5m. Το πλέγμα έχει διαστάσεις 20m x 20m και είναι κατασκευασμένο από χάλκινους αγωγούς ακτίνας 1cm. Το έδαφος είναι διστρωματικό. Η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι $\rho_1=20\Omega\text{m}$ και το βάθος του είναι $h_1=5\text{m}$. Η ειδική αντίσταση του δευτέρου στρώματος είναι $\rho_2=100\Omega\text{m}$ ενώ το βάθος του θεωρείται άπειρο. Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους



Σχήμα 2: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος



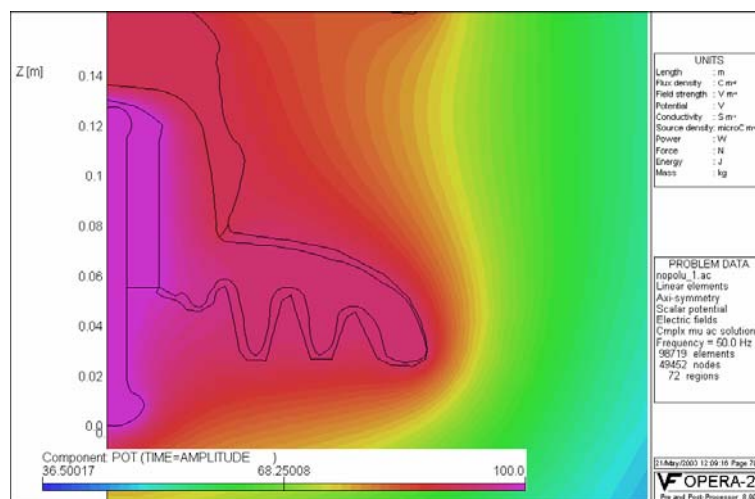
Σχήμα 3: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό πρόβλημα που εξετάζεται είναι η περίπτωση μίας κατακόρυφης ράβδου τοποθετημένης 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 2. 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 3 [7]. Έγινε σειρά προσομοιώσεων στο πρόγραμμα PC Opera και συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές καμπύλες των Takahashi και Kawase [15, 16] για πολυστρωματικό έδαφος, αλλά και με τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες για μονοστρωματικό και διστρωματικό έδαφος [7, 17]. 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 [15, 16] 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.

ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ

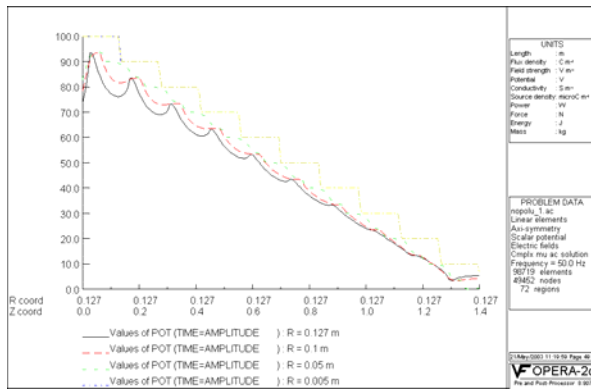
Το πρόγραμμα OPERA χρησιμοποιήθηκε για να πραγματοποιήσει την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σε αλυσίδα μονωτήρων πορσελάνης όταν αυτή καταπονείται από υψηλή τάση βιομηχανικής συχνότητας [18]. Επιπλέον, επιχειρήθηκε να προσομοιωθεί η ρύπανση στην επιφάνεια των μονωτήρων. Γι' αυτήν την ανάλυση η ρύπανση στην επιφάνεια των μονωτήρων έχει προσεγγιστεί με ένα λεπτό αγώγιμο στρώμα. Το μοντέλο της αλυσίδας μονωτήρων αναλύθηκε μέσω του OPERA-2d αξιοποιώντας την αξονική συμμετρία του προβλήματος μέσω της οποίας το πρόβλημα τριών διαστάσεων μετατράπηκε σε δισδιάστατο.

Επισημαίνεται ότι κατά τις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των ιδιοτήτων των υλικών (αγωγιμότητα και επιτρεπτότητα), που εισάγονται ως δεδομένα στο πρόγραμμα, έχουν πολύ μεγάλη σημασία για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, η ακριβής γνώση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών (πορσελάνη, σίδηρος, τσιμέντο) είναι πολύ σημαντική για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

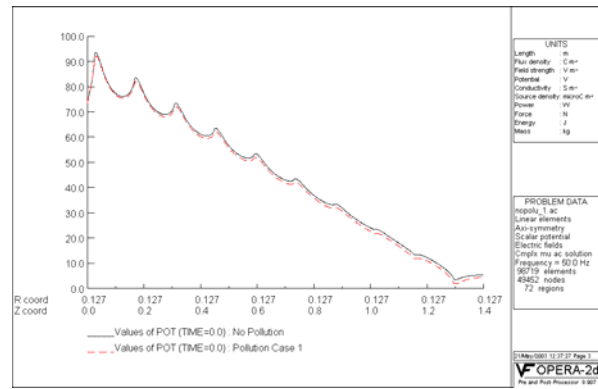


Σχήμα 4: Κατανομή δυναμικού στον δέκατο μονωτήρα της αλυσίδας μονωτήρων.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στον δέκατο μονωτήρα, δηλαδή στον μονωτήρα που βρίσκεται πλησιέστερα στην πλευρά της υψηλής τάσης και υφίσταται τη μέγιστη καταπόνηση καθώς η κατανομή της τάσης κατά μήκος της αλυσίδας δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά η επιβαλλόμενη τάση στους μονωτήρες αυξάνεται προς την πλευρά της γραμμής μεταφοράς. Στο Σχήμα 5α εμφανίζεται η κατανομή δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα του μοντέλου και σε διαφορετικές αποστάσεις από αυτόν. Στο Σχήμα 5β παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού κατά μήκος μίας γραμμής παράλληλης στον άξονα συμμετρίας της αλυσίδας, σε απόσταση από αυτόν τον άξονα ίση με την ακτίνα των μονωτήρων. Στο σχήμα αυτό συγκρίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις, οι μονωτήρες να φέρουν στρώμα ρύπανσης ή όχι.



(α)

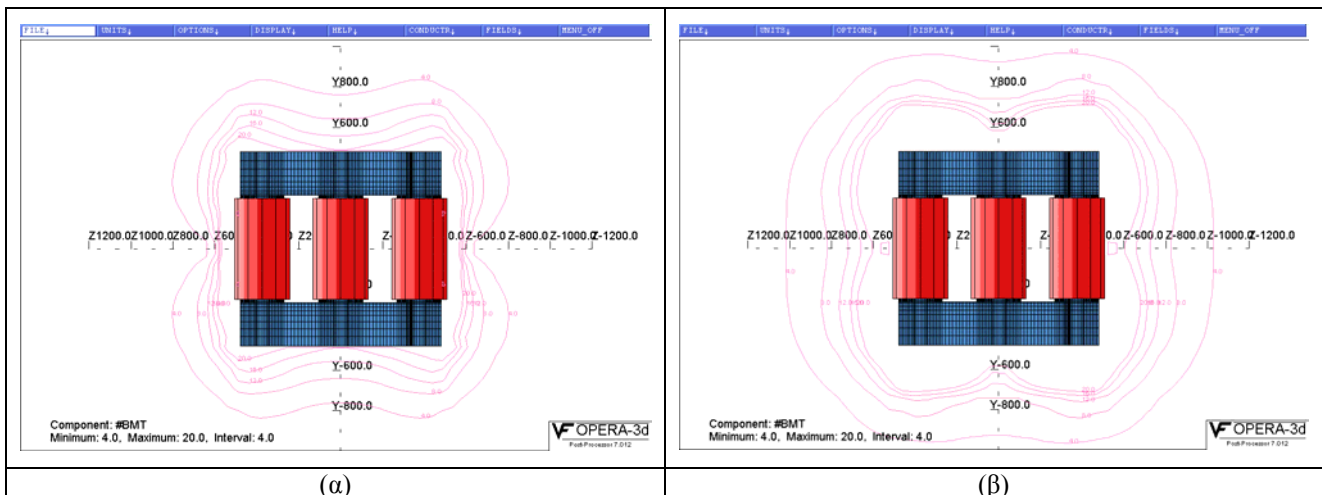


(β)

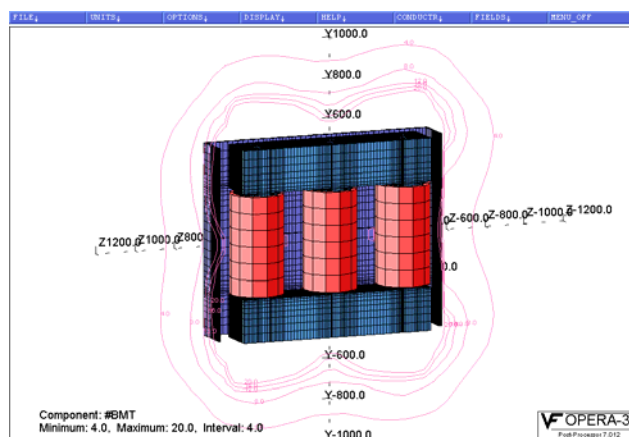
Σχήμα 5: α) Κατανομή δυναμικού σε καθαρούς μονωτήρες,
β) Κατανομή δυναμικού σε καθαρούς και σε ρυπασμένους μονωτήρες.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Οι μετασχηματιστές υποσταθμών μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το τρισδιάστατο πρόγραμμα OPERA. Το τρισδιάστατο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός μετασχηματιστή διανομής 800kVA εξετάζεται για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του μετασχηματιστή, ενώ παρουσιάζονται και οι επιδράσεις του φαινομένου του κορεσμού στους μετασχηματιστές. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η ανάπτυξη των δινορρευμάτων στο προστατευτικό κάλυμμα των μετασχηματιστών, τα οποία δημιουργούν προβλήματα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας [19]. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται το μαγνητικό πεδίο σκέδασης σε κορεσμένο και μη κορεσμένο μετασχηματιστή.



Σχήμα 6: α) Πεδίο σκέδασης σε μη κορεσμένο μετασχηματιστή
β) Πεδίο σκέδασης σε κορεσμένο μετασχηματιστή

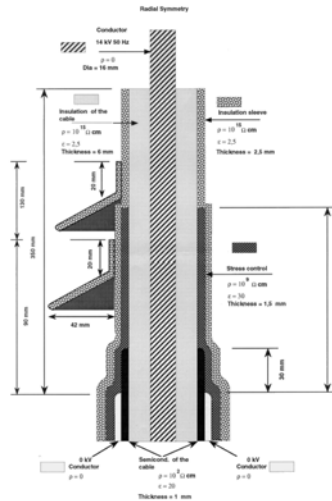


Σχήμα 7: Πεδίο σκέδασης σε κορεσμένο μετασχηματιστή με προστατευτικό περίβλημα.

Στη συνέχεια στο μοντέλο προστέθηκε ένα περίβλημα πάχους 10mm κατασκευασμένο από μαλακό χάλυβα. Σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7. Από Σχήμα 7 διαφαίνεται ότι το πεδίο σκέδασης στο χώρο εκτός του χαλύβδινου περιβλήματος έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με το αντίστοιχο, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 και αναφέρεται σε μετασχηματιστή χωρίς περίβλημα. Επιπλέον παρατηρείται ένα μικρό ποσοστό ασυμμετρίας, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμπεριέχουν τη μη γραμμική μαγνητική διαπερατότητα μ .

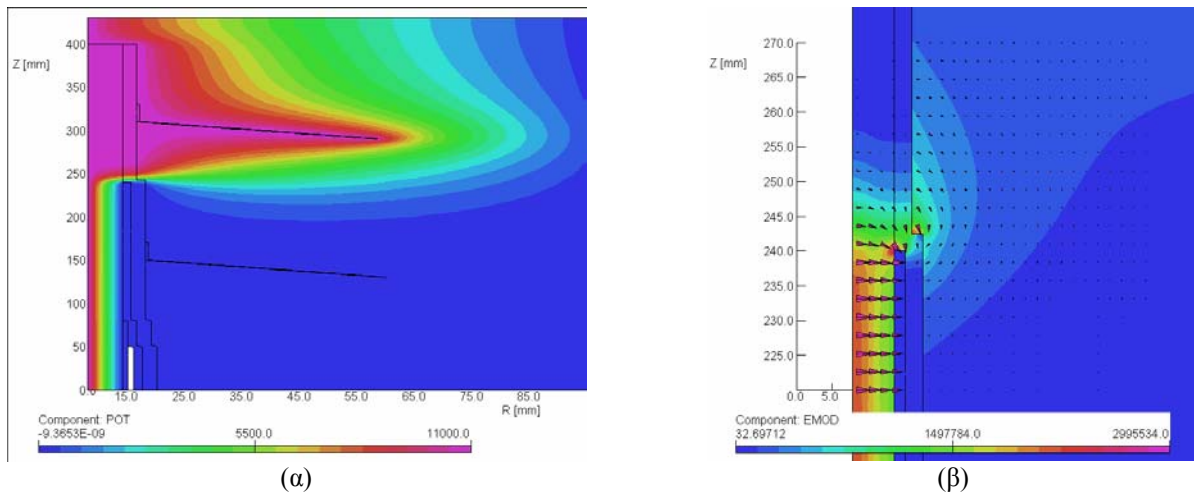
ΚΑΛΩΔΙΑ

Στο σχεδιαστικό περιβάλλον του προγράμματος OPERA μοντελοποιήθηκαν τα ακροκιβώτια ενός καλωδίου μέσης τάσης τύπου TTE 24-185 τάσης με δύο κυάθια [20, 21]. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το υπό μελέτη καλώδιο σε τομή.



Σχήμα 8: Καλώδιο μέσης τάσης τύπου TTE 24-185.

Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτά προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου μέσω του προγράμματος.



Σχήμα 9: α) Η κατανομή του δυναμικού και β) Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του τερματισμού του καλωδίου

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Vector Fields, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση δισδιάστατων, και τρισδιάστατων προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές για την εύρεση της κατανομής δυναμικού σε διάφορες διατάξεις όπως:

- Συστήματα γειώσεως: προσομοιώνονται διάφορες διατάξεις εδάφους πολυστρωματικής δομής και μελετάται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Οι προσομοιώσεις του προγράμματος συγκρίνονται με αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα και καταδεικνύεται η υψηλού βαθμού ακρίβεια των υπολογισμών.

- **Μονωτήρες:** η προσομοίωση εστιάζεται στον υπολογισμό των παραμέτρων του ηλεκτροστατικού πεδίου, που αναπτύσσεται τόσο στο εσωτερικό του μονωτήρα, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο, οδηγώντας σε υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
- **Μετασχηματιστές:** σ' αυτή την περίπτωση υπολογίζονται οι παράμετροι του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική ροή, η επαγωγή, η ροή σκέδασης καθώς και τα αναπτυσσόμενα δινορρεύματα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον προσδιορισμό του σημείου κορεσμού, το οποίο έχει μεγάλη σημασία για τη μελέτη ενός μετασχηματιστή.
- **Καλώδια μέσης και υψηλής τάσης:** οι σχετικές προσομοιώσεις επικεντρώνονται στη μελέτη της πεδιακής κατανομής γύρω από τα ακροκιβώτια καλωδίων, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη βέλτιστη διαμόρφωση του τερματισμού τους.

Βιβλιογραφία

- [1] Vector Fields, 'OPERA-2d User Guide', Vector Fields Limited, England, 1999.
- [2] Vector Fields, 'OPERA-3d User Guide', Vector Fields Limited, England, 1999.
- [3] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.
- [4] 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.
- [5] Aravanis J., Tzouvelekis E., Chronopoulos C., Antoniou T., "Computing Method of the Equivalent resistivity of non-uniform Soil for the Design of transmission Substation Grounding Grids", Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003), Thessaloniki, Greece, September 1-3, 2003, pp. 709-712.
- [6] 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.
- [7] Γκόνος Ι.Φ., "Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopoulos 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.
- [12] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopoulos I.A.: "Influence of the Soil Non-uniformity to the Potential Distribution around a driven rod", Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, World Scientific and Engineering Society, pp. 94-98, 2001.
- [13] Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: "Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, (TPWRD-00083-2003, υπό έκδοση).
- [14] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopoulos I.A., "Influence of the Soil Non-uniformity to the Potential Distribution around a driven rod", Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, World Scientific and Engineering Society, 2001, pp. 94-98.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Tagg G.F., "Earth Resistances", George Newnes Limited, London, 1964.
- [18] Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Michaelidis A.M., "Calculation of the Electric Field on an Insulator using the Finite Elements Method", Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003), Thessaloniki, Greece, September 1-3, 2003, pp. 65-68.
- [19] Riley C.P., Michaelidis A.M., "The electromagnetic fields of energized transmission circuits and substations modeling and optimization", MEDPOWER 98, Cyprus, November 16 - 18, 1998
- [20] A. Michaelides, C.P. Riley, A.P. Jay, G. Molinari, P. Alotto, A. Zubiani, A. D'Souza, J. Madail Vaiga, "Parametric FEA for the Design of electric Insulating Components", EU Project ADETEC, MedPower 2002, November 2002, Athens, Greece.
- [21] P. Alotto, G. Molinari, A. Michaelides, C.P. Riley, A.P. Jay, A. Zubiani, A. D'Souza, J. Madail Vaiga, "A transient formulation for the design of electric insulating/conducting components: EU Project ADETEC", IGTE 2002, 10th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, September 2002, Gratz, Austria.