

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ Θ. ΚΟΝΤΑΡΓΥΡΗ

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

Επιβλέπων Καθηγητής: **ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΘ. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ**

Μέλη της τριμελούς εισηγητικής επιτροπής

ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΘ. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΣ Β. ΤΟΠΑΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Ν. ΔΙΑΛΥΝΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων γραμμών μεταφοράς.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων είναι: η μορφή των μονωτήρων, το υλικό κατασκευής τους, το μέγεθός τους, οι παράσιτες χωρητικότητες, που αναπτύσσονται ως προς τη γη και ως προς την υψηλή τάση, το είδος και η ποσότητα της ρύπανσης που επικάθεται στην επιφάνειά τους.

Τα κύρια σημεία της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι:

- Η πειραματική μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την ανάρτηση γραμμών Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσεως.
- Η αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων περί της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, προκειμένου να υπολογιστούν οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς τη γη και ως προς την υψηλή τάση, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.
- Η πεδιακή προσέγγιση των μονωτήρων, μέσω της δημιουργίας δισδιάστατων μοντέ-

λων, αξιοποιώντας τη συμμετρία που παρουσιάζουν. Στα μοντέλα αυτά λαμβάνεται υπ' όψιν η πιθανότητα επικάθησης ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων.

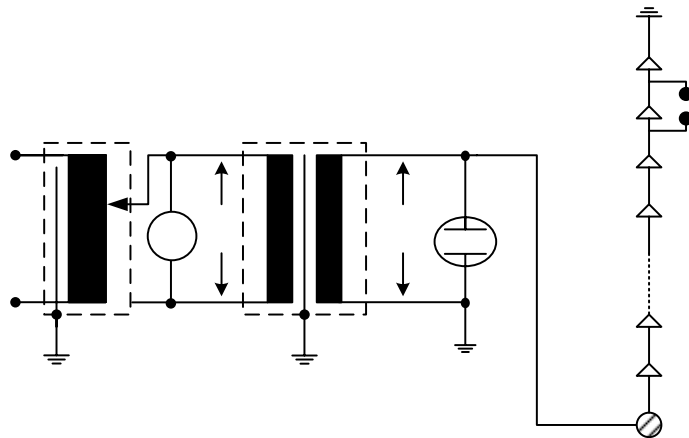
- Η πεδιακή προσέγγιση των μονωτήρων, μέσω της δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων, λαμβάνοντας υπ' όψιν μη συμμετρικά στοιχεία πλησίον του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων, που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.
- Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα, με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του και τη ρύπανσή του, με χρήση τόσο τεχνητού νευρωνικού δικτύου, όσο και συστήματος ασαφούς λογικής.
- Η αξιολόγηση υπάρχουσών αναλυτικών μεθοδολογιών υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μονωτήρα και της ρύπανσης. Η σύνθεση αυτών των μεθοδολογιών οδήγησε στον υπολογισμό των σταθερών του τόξου, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.
- Η ανάπτυξη πολυκριτηριακής μεθοδολογίας λήψης απόφασης, για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα.

2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Όπως διαφάνηκε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο προσδιορισμός της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα μονωτήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αξιολόγηση και την επιλογή του προς χρήση. Για το λόγο αυτό διεξήχθησαν μετρήσεις για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV.

Τα πειράματα αυτά, καθώς και προγενέστερα διεξαχθέντα πειράματα, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών, καθώς και για την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών.

Προκειμένου να προσδιοριστεί πειραματικά η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του Σχήματος 2.1 [1].



Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης.

Η διάταξη περιλαμβάνει έναν αυτομετασχηματιστή (230/0...230)V, η είσοδος του οποίου συνδέεται, μέσω ενός σταθεροποιητή, στην παροχή της Δ.Ε.Η. (230V, 50Hz) και η έξοδός του τροφοδοτεί ένα μετασχηματιστή 110V/55kV. Η εφαρμοζόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα μετρήθηκε τοποθετώντας ένα βολτόμετρο στο πρωτεύον του μετασχηματιστή και πολλαπλασιάζοντας την ένδειξή του με το λόγο μετασχηματισμού a ($a=500$) [2, 3]. Προκειμένου να ελεγχθεί η αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων, η επιβαλλόμενη τάση στο μονωτήρα μετρήθηκε με ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, συνδεδεμένο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Οι ενδείξεις του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές του βολτομέτρου, το οποίο είχε συνδεθεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.

Η επιβαλλόμενη τάση U_2 αυξάνεται, έως ότου στο σπινθηριστή, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, εφαρμοστεί η τάση διάσπασής του U_d . Το ποσοστό της τάσης P_i , το οποίο εφαρμόζεται στον i -οστό δισκοειδή μονωτήρα της αλυσίδας, δίνεται από τη σχέση:

$$P_i = \frac{U_d}{U_{2i}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

όπου U_{2i} είναι η τρέχουσα τιμή της U_2 , όταν με το σπινθηριστή παράλληλο στον i -οστό δίσκο, αυτός διασπάται.

Μετακινώντας το σπινθηριστή, παράλληλα, εκάστοτε, σε έναν έκαστο από τους δισκοειδείς μονωτήρες (Σχήμα 2.1), προκύπτουν n το πλήθος (n : πλήθος των δίσκων της αλυσίδας) ποσοστά P_i , τα οποία αθροιζόμενα δίνουν, προφανώς 1:

$$\sum_{i=1}^n P_i = U_d \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{2i}} = 1 \quad (2.2)$$

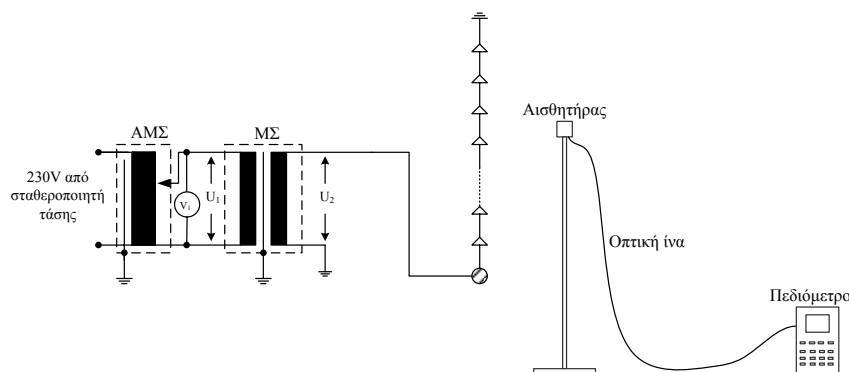
Από τη (2.2) προκύπτει η τάση διάσπασης U_d του σπινθηριστή, στη συνέχεια δε, γνωστής, πλέον, αυτής, από την εξίσωση υπολογίζεται η επιβαλλόμενη τάση U_{2i} σε κάθε δισκοειδή μονωτήρα.

Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε το πεδιόμετρο PMM 8053A και ο αισθητήρας (probe) PMM EHP 50B [4], τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας (Σχήμα 2.2). Το σημείο ανάρτησης του αγωγού θεωρήθηκε ως το σημείο ($X=0, Y=0, Z=0$) του χώρου. Ο άξονας X θεωρήθηκε συγγραμμικός στον αγωγό υψηλής τάσης, ο άξονας Z συγγραμμικός στον αλυσοειδή μονωτήρα και ο άξονας Y κάθετος στο επίπεδο XOZ . Το σύστημα αξόνων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε έντεκα θέσεις (Α-Κ) του οριζοντίου επιπέδου XOY ($Z=0$), ενώ παράλληλα, με τη βοήθεια επάλληλων σωλήνων, πάνω στους οποίους ενσωματώθηκε ο αισθητήρας, λήφθηκαν μετρήσεις σε διάφορα σημεία κατά μήκος γραμμών, κάθετων στο οριζόντιο επίπεδο XOY , οι οποίες ξεκινούν από τις έντεκα θέσεις Α-Κ. Οι συντεταγμένες των έντεκα θέσεων του οριζοντίου επιπέδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.

Με τη βοήθεια του πεδιομέτρου μετρήθηκε το μέτρο των τριών συνιστωσών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E_x, E_y, E_z), καθώς και η συνολική τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E_t , η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2.3)$$

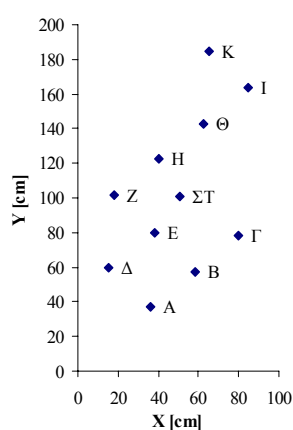
Η εφαρμοζόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα ήταν ίση με 20kV.



Σχήμα 2.2: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2.3: Το σύστημα αξόνων για τη λήψη των μετρήσεων.



Θέση	X [cm]	Y [cm]
A	36,0	37,5
B	58,0	57,5
Γ	80,0	78,5
Δ	15,5	59,5
Ε	38,0	80,0
ΣΤ	50,5	100,5
Ζ	18,0	102,0
Η	40,0	122,5
Θ	62,5	143,0
Ι	85,0	163,5
Κ	65,5	185,0

Σχήμα 2.4: Απεικόνιση θέσεων στο οριζόντιο επίπεδο ΧΟΥ.

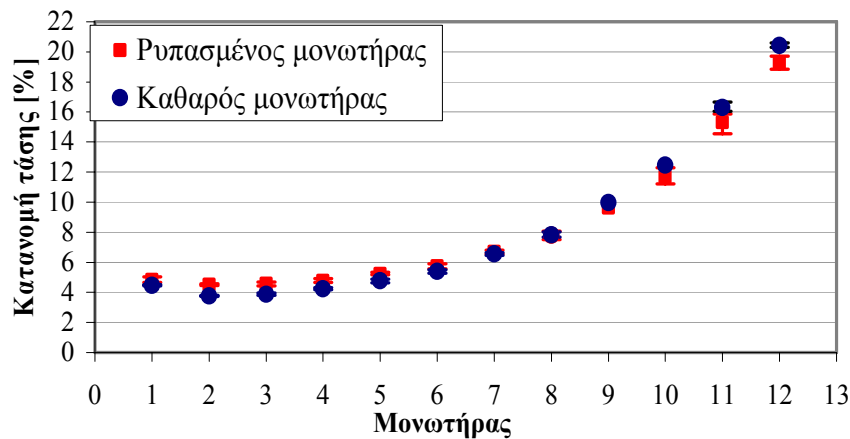
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση αφ' ενός μεν του σχήματος και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα, αφ' ετέρου δε της επιφανειακής ρύπανσης των μονωτήρων τόσο στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος των αλυσοειδών μονωτήρων είναι ανομοιομόρφη, με αποτέλεσμα ο δισκοειδής μονωτήρας πλησίον του αγωγού υψηλής τάσης να καταπονείται με το μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης σε σχέση με τους υπόλοιπους μονωτήρες. Το ποσοστό αυτό είναι περίπου τετραπλάσιο από το αντίστοιχο ποσοστό

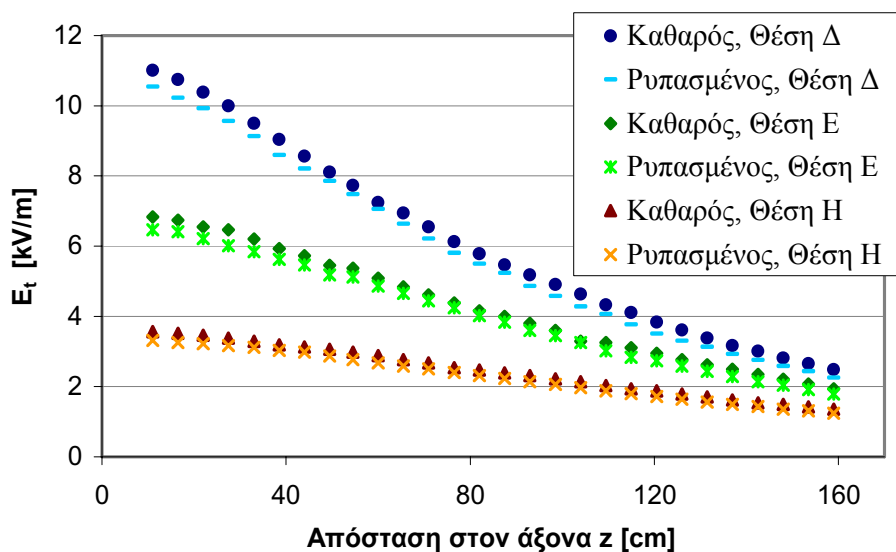
του δισκοειδούς μονωτήρα με τη μικρότερη καταπόνηση, για αλυσίδες αποτελούμενες από δέκα ή δώδεκα δίσκους. Η ανομοιομορφία της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης οφείλεται στην ανάπτυξη παράσιτων χωρητικότητων μεταξύ των μεταλλικών μερών του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα και αφ' ενός του αγωγού υψηλής τάσης και αφ' ετέρου του πυλώνα (γη). Η μέση τιμή των παράσιτων χωρητικότητων ως προς γη είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή των παράσιτων χωρητικότητων ως προς τη γραμμή μεταφοράς, γεγονός που εξηγεί την αύξηση της καταπόνησης των δισκοειδών μονωτήρων καθώς προσεγγίζουμε τον αγωγό υψηλής τάσης. Η καταπόνηση των δισκοειδών μονωτήρων μειώνεται σταδιακά πλησιάζοντας προς τον πυλώνα, αν και το ποσοστό της επιβαλλόμενης τάσης στον πρώτο ή στους δύο πρώτους δισκοειδείς μονωτήρες (πλησίον του πυλώνα) είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό του αμέσως επόμενου δισκοειδούς μονωτήρα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των παρασίτων χωρητικότητων προς γην στους δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του πυλώνα, η οποία συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της παράσιτης χωρητικότητας ως προς την υψηλή τάση.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης για τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου, τύπου ομίχλης, όταν αυτός είναι καθαρός ή υπό συνθήκες ρύπανσης. Ο αλυσοειδής μονωτήρας ήταν ρυπασμένος με τυχαίο τρόπο, με αποτέλεσμα τόσο η ποσότητα της ρύπανσης, όσο και το είδος της να μην είναι προσδιορισμένα. Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στο ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα τείνει να γίνει πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή στον καθαρό. Ο πρώτος έως και ο έβδομος δισκοειδής μονωτήρας καταπονούνται με μεγαλύτερη τάση στην περίπτωση της ρυπασμένης αλυσίδας, ενώ η καταπόνηση του όγδοου έως και του δωδέκατου δισκοειδή μονωτήρα είναι μικρότερη. Ο καθαρός δισκοειδής μονωτήρας πλησίον του αγωγού καταπονείται με 6% μεγαλύτερη τάση σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ρυπασμένο. Αν και η επιδίωξη για ομοιόμορφη κατανομή φαίνεται να ικανοποιείται με την επικάλυψη ρύπανσης, η ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών ισχύος, η μείωση της κρίσιμης έντασης και ο κίνδυνος ανωμαλιών καθιστούν, προφανώς, ανεπιθύμητη την ύπαρξη ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων. Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα όσο πιο ομοιόμορφη (μικρότερες δι-

αφορές δυναμικού) είναι η κατανομή της τάσης, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Από το Σχήμα 2.6 προκύπτει ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ένταση στον καθαρό.

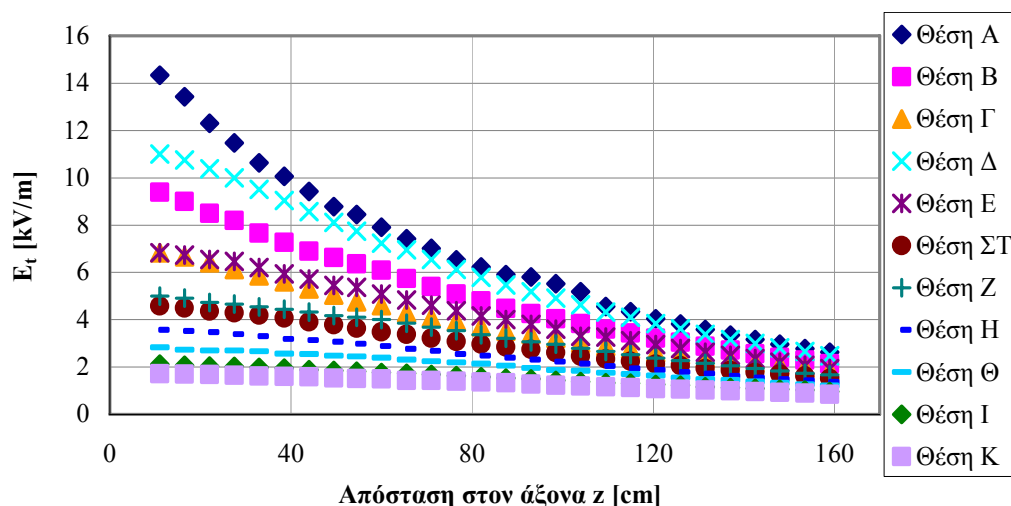


Σχήμα 2.5: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον καθαρό και στο ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.



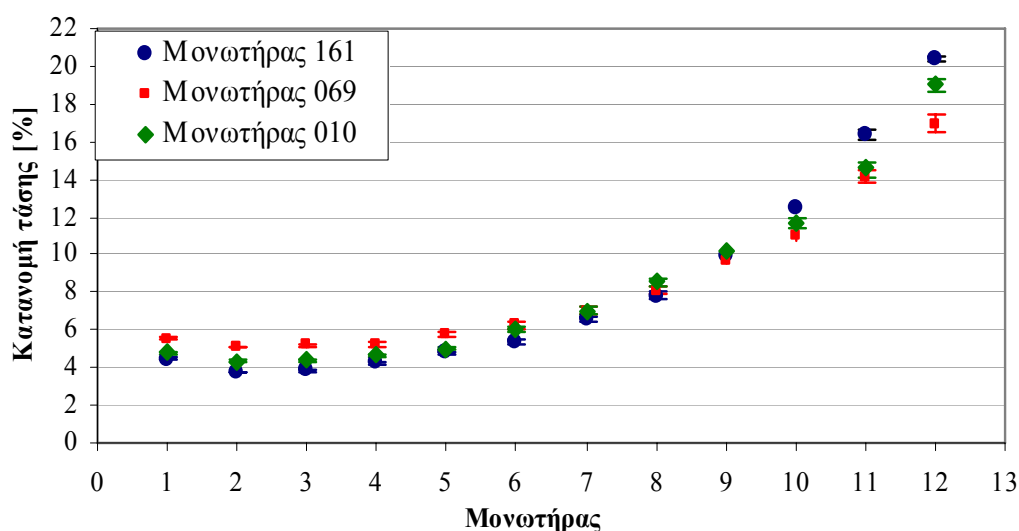
Σχήμα 2.6: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στον καθαρό και στο ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.

Όσον αφορά στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση από τον αγωγό υψηλής τάσης, είτε στο κάθετο, είτε στο οριζόντιο επίπεδο, οδηγεί σε μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 2.7). Σε θέσεις πλησίον του αλυσσοειδούς μονωτήρα, η μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι εκθετική, ενώ σε απομακρυσμένες θέσεις τείνει να γίνει γραμμική.

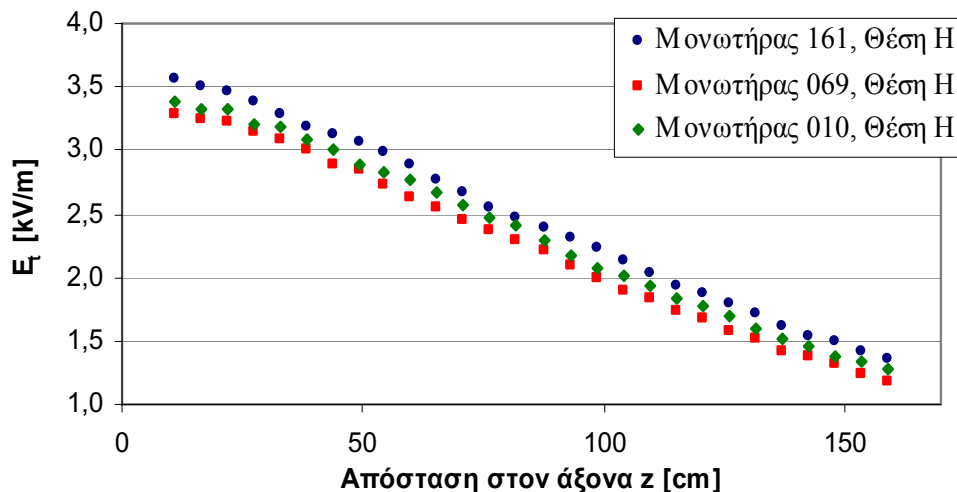


Σχήμα 2.7: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.

Η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Στα Σχήματα 2.8 και 2.9 φαίνεται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (θέση Η) για τρεις αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, οι οποίοι αποτελούνται από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες. Παρατηρείται ότι ο αλυσοειδής μονωτήρας με τις μεγαλύτερες διαστάσεις (κωδικός 069) εμφανίζει πιο ομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και συνεπώς μικρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου.

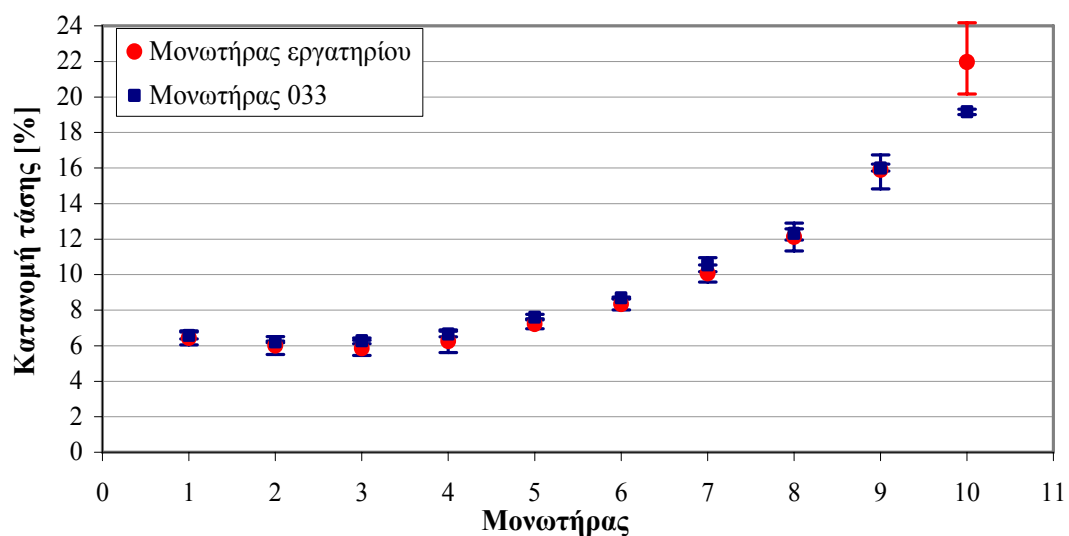


Σχήμα 2.8: Σύγκριση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε τρεις μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.

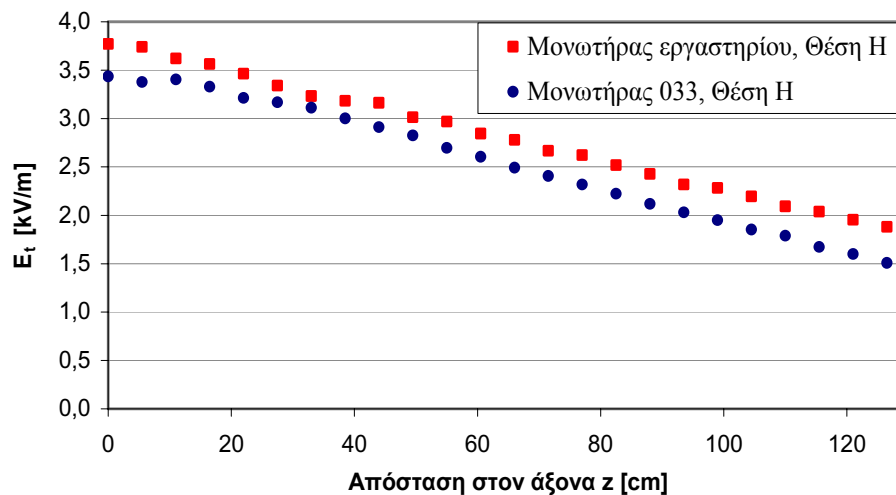


Σχήμα 2.9: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε τρεις μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.

Η επίδραση του υλικού κατασκευής των μονωτήρων στην κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου φαίνεται στα Σχήματα 2.10 και 2.11, όπου ο αλυσσοειδής μονωτήρας υάλου (033) συγκρίνεται με τον ιδίων διαστάσεων αλυσσοειδή μονωτήρα πορσελάνης (εργαστηρίου). Ο μονωτήρας υάλου παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή από το μονωτήρα πορσελάνης. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά του γυαλιού σε σχέση με την πορσελάνη, με αποτέλεσμα οι μονωτήρες υάλου να εμφανίζουν μεγαλύτερη κύρια χωρητικότητα.



Σχήμα 2.10: Σύγκριση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε δύο μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες.

Οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συμβάλλουν σημαντικά στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων, ιδίως γιατί διεξήχθησαν με δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

3. ΠΕΔΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Οι ληφθείσες μετρήσεις αποτέλεσαν τη βάση για την αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την πεδιακή επίλυση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης μονωτήρων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις διαφόρων τύπων μονωτήρων, ρυπασμένων ή μη, με σκοπό τον υπολογισμό αφ' ενός μεν της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, αφ' ετέρου δε του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό των μονωτήρων, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν στο OPERA-2d, το οποίο επιλύει την εξίσωση Poisson ($\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho$), ενώ, επιπρόσθετα, αποφασίζει αν θα επιλύσει την εξίσωση ροής ρεύματος, ελέγχοντας κατά πόσον το μοντέλο περιέχει κάποιο υλικό, στο οποίο η αγωγιμότητα σ έχει μη μηδενική τιμή [5]:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (3.1)$$

Στην περίπτωση χρονομεταβλητών προβλημάτων, υπό την προϋπόθεση ότι φαινόμενα επαγωγής είναι αμελητέα σε ημιαγώγιμα διηλεκτρικά προβλήματα, το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση:

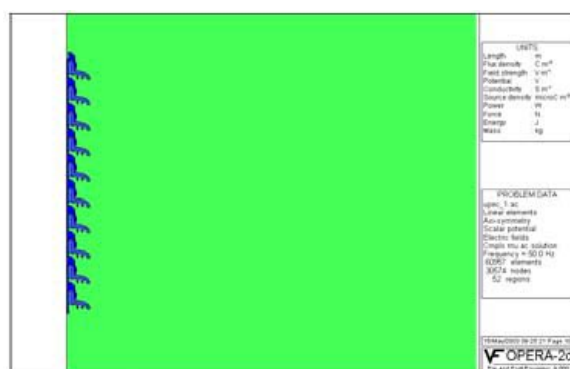
$$\nabla \cdot \epsilon_c \nabla V = 0 \quad (3.2)$$

όπου

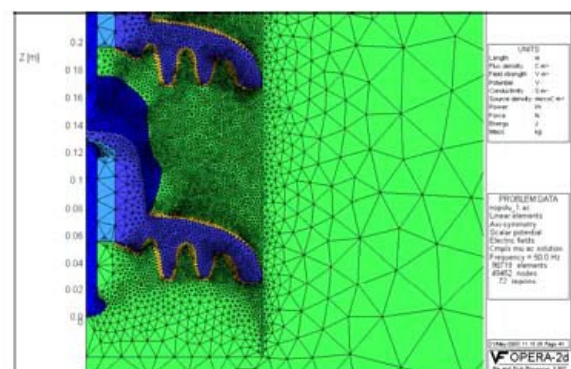
$$\epsilon_c = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r - j \cdot \frac{\sigma}{\omega} \quad (3.3)$$

Προκειμένου να είναι εφικτή η αναπαράσταση της διάταξης ενός μονωτήρα από ένα δισδιάστατο μοντέλο, γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του είναι ίδια σε κάθε αξονική τομή (συμμετρικό εκ περιστροφής). Συνεπώς, στη δισδιάστατη διάταξη δεν είναι δυνατό να ληφθούν υπ' όψιν μη συμμετρικά στοιχεία, όπως η γραμμή μεταφοράς.

Προκειμένου να μελετηθεί η διηλεκτρική συμπεριφορά μονωτήρων, προσομοιώθηκε ένας αλυσσοειδής μονωτήρας πορσελάνης τύπου cap and pin αποτελούμενος από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες, καθένας από τους οποίους έχει διάμετρο 254mm, ύψος 146mm και μήκος ερπυσμού 305mm. Ο συγκεκριμένος αλυσσοειδής μονωτήρας χρησιμοποιείται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV. Στο Σχήμα 3.1α παρουσιάζεται το μοντέλο, όπως αυτό δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Κατά την προσομοίωση, η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων είναι υψηλότερη στις 'κρίσιμες' περιοχές, στις οποίες απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές (Σχήμα 3.1β).



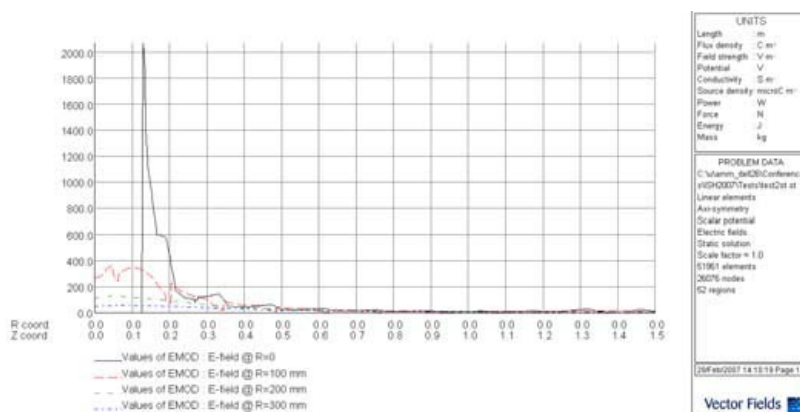
(α)



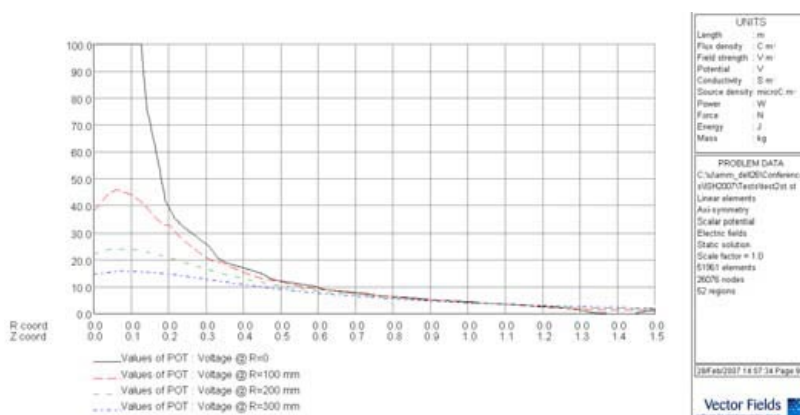
(β)

Σχήμα 3.1: α) Μοντέλο αλυσσοειδούς μονωτήρα, β) πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε τμήμα του αλυσσοειδούς μονωτήρα.

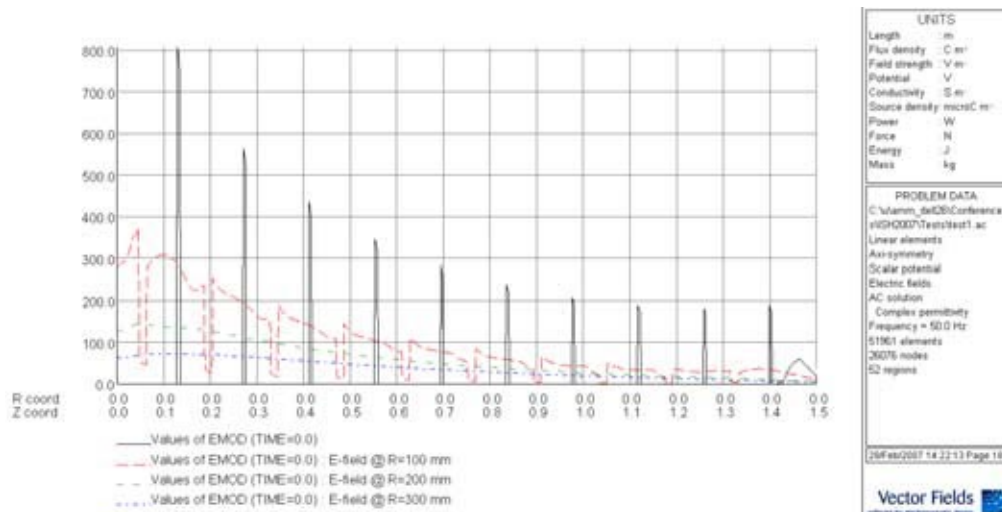
Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροστατικός επιλύτης του προγράμματος OPERA-2d. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών, οι οποίες είναι παράλληλες στον άξονα του μονωτήρα, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, ενώ στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των ίδιων γραμμών. Επειδή ο ηλεκτροστατικός επιλύτης λαμβάνει υπ' όψιν του μόνο την επιτρεπτότητα των υλικών, και, προκειμένου να συνυπολογιστεί η τιμή της αγωγιμότητας των υλικών του μονωτήρα (πορσελάνη, τσιμέντο, μέταλλο), το προηγούμενο μοντέλο αλυσοειδούς μονωτήρα επιλύθηκε ως ένα πρόβλημα διηλεκτρικών με απώλειες (lossy dielectrics). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για συχνότητα 50Hz. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό κατά μήκος, παράλληλων στον άξονα του μονωτήρα, γραμμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4 και 3.5.



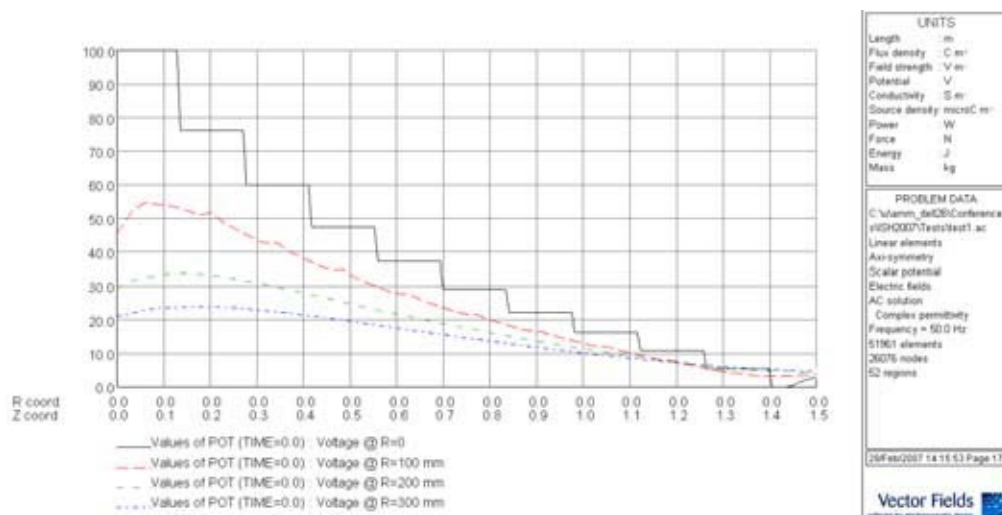
Σχήμα 3.2: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για ηλεκτροστατική ανάλυση.



Σχήμα 3.3: Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για ηλεκτροστατική ανάλυση.

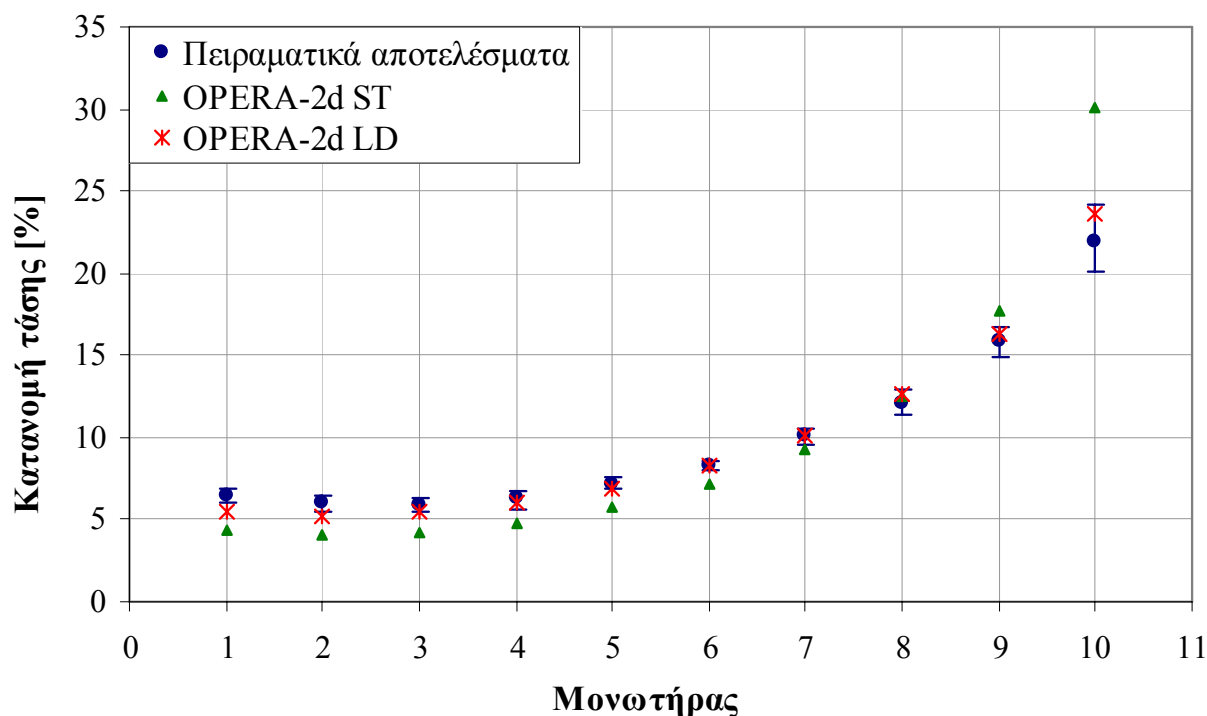


Σχήμα 3.4: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για συχνότητα 50Hz (lossy dielectrics).



Σχήμα 3.5: Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για συχνότητα 50Hz (lossy dielectrics).

Στο Σχήμα 3.6 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ηλεκτροστατική ανάλυση και ανάλυση διηλεκτρικών με απώλειες, με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης. Η ανάλυση διηλεκτρικών με απώλειες για συχνότητα 50Hz βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, μειώνοντας το μέσο σφάλμα μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης από 20,83% (ηλεκτροστατική επίλυση) σε 6,04% (επίλυση διηλεκτρικών με απώλειες).



Σχήμα 3.6: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα.

Επιπρόσθετα, το μοντέλο επιλύθηκε πεδιακά στην περίπτωση, που η επιφάνεια του μονωτήρα έχει καλυφθεί από στρώμα ρύπανσης. Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες ρύπανσης, για τις οποίες υπάρχουν πειραματικά δεδομένα στη βιβλιογραφία [6]. Η ισοδύναμη πυκνότητα επικαθήσεως άλατος C (ESDD) ως δείκτης της σφοδρότητας της ρύπανσης μεταβαλλόταν από $C=0,02\text{mg/cm}^2$ έως $C=0,3\text{mg/cm}^2$.

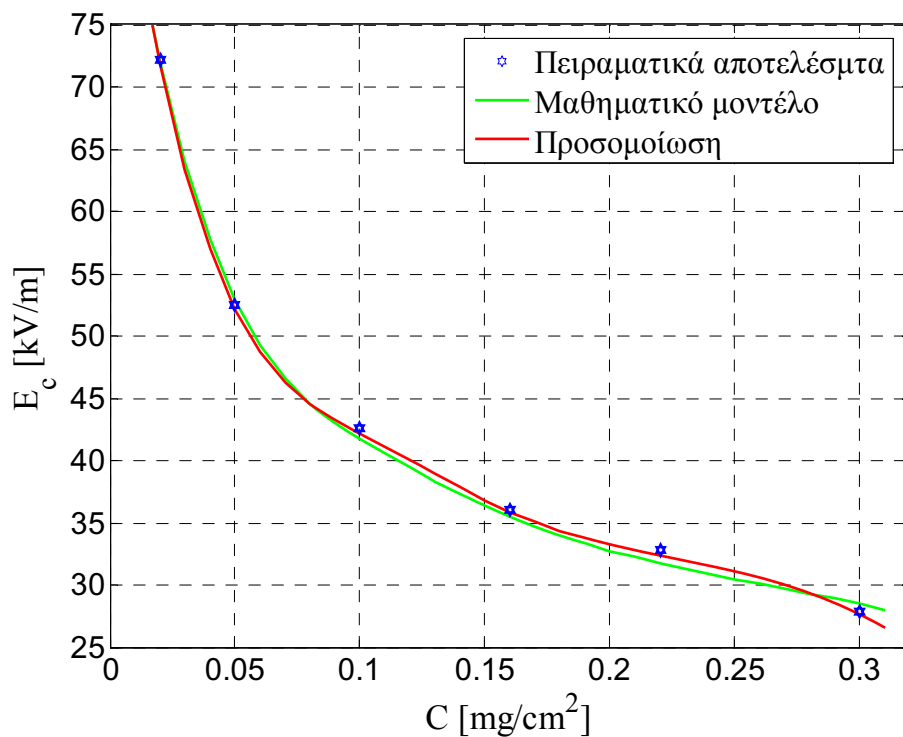
Οι διάφορες περιπτώσεις ρύπανσης προσομοιώθηκαν μεταβάλλοντας το πάχος του στρώματος ρύπανσης, ενώ η εφαρμοζόμενη τάση επιλέχθηκε για κάθε ποσότητα ρύπανσης, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παράλληλα, εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο [7], το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για τις συνθήκες του πειράματος.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα, η κρίσιμη τάση U_c , η οποία μετρήθηκε πειραματικά και υπολογίστηκε μέσω του μαθηματικού μοντέλου, μετατράπηκε σε κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_c μέσω της σχέσης (3.4). Αντίθετα, από το πρόγραμμα προσομοίωσης

υπολογίζεται απ' ευθείας η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

$$E_c = \frac{U_c}{L} \quad (3.4)$$

όπου L είναι το μήκος ερπυσμού.



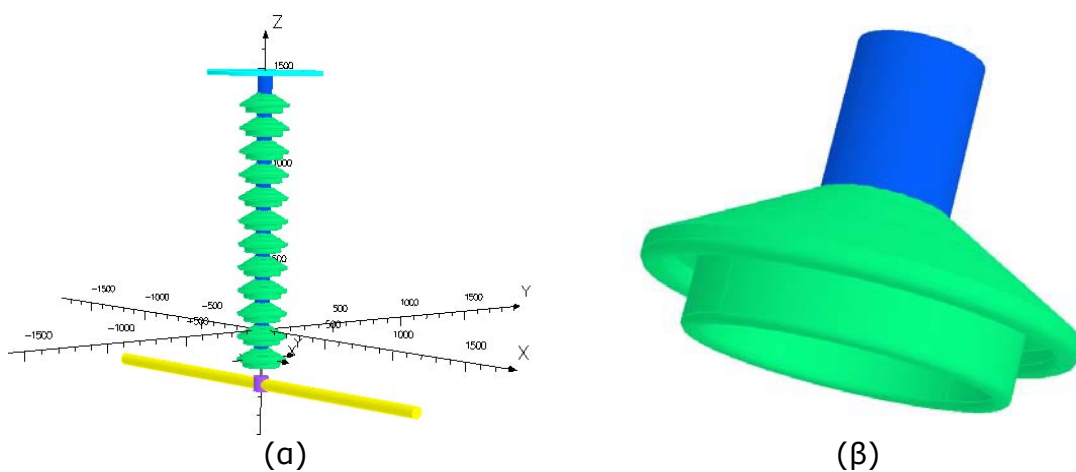
Σχήμα 3.7: Κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της ρύπανσης.

Από τη γραφική παράσταση του Σχήματος 3.7 παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων, των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων του προγράμματος προσομοίωσης. Συνεπώς, το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι δυνατό να αποτελέσει ένα βοηθητικό εργαλείο για το σχεδιασμό μονωτήρων προσφέροντας το πλεονέκτημα, σε σχέση με άλλους τρόπους εκτίμησης του πεδίου, ότι μπορεί να υπολογίσει την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.

Οι δισδιάστατες προσομοιώσεις εκμεταλλεύονται την αξονική συμμετρία, που παρουσιάζει ένας μονωτήρας. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις, όμως, είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν μη συμμετρικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με το μονωτήρα, όπως η γραμμή μεταφοράς και ο πυλώνας, και επηρεάζουν τόσο την κατανομή της

τάσης, όσο και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης των μονωτήρων στο πρόγραμμα OPERA-3d [8]. Η μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις επέτρεψε να ληφθούν υπ' όψη μη συμμετρικά στοιχεία, συνδεδεμένα με το μονωτήρα, κάτι που οδήγησε σε αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ο οποίος αποτελείται από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.



Σχήμα 3.8: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου 150kV.

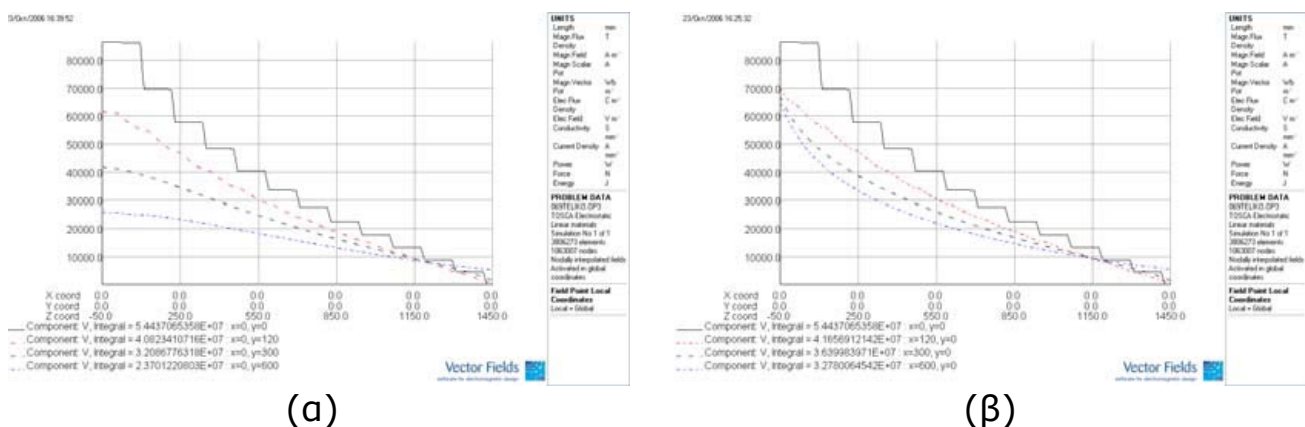
Στα Σχήματα 3.9 – 3.10, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Z και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα X ($Y=0$) και του άξονα Y ($X=0$). Οι γραμμές ($X=120\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$) και ($X=0\text{mm}$, $Y=120\text{mm}$) παρουσιάζουν απότομες βυθίσεις εκεί που διαπερνούν την άκρη των εξωτερικών πτυχώσεων των δισκοειδών μονωτήρων. Οι βυθίσεις αυτές οφείλονται στη μεγαλύτερη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς της πορσελάνης από τον περιβάλλοντα αέρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εντός της πορσελάνης.

Η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμής, που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, παρουσιάζεται σε ξεχωριστή γραφική παράσταση (Σχήμα 3.10γ), καθώς οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου διαφέρουν σημαντικά σε τάξη μεγέθους από αντίστοιχες τιμές εκτός του μονωτήρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10γ, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των

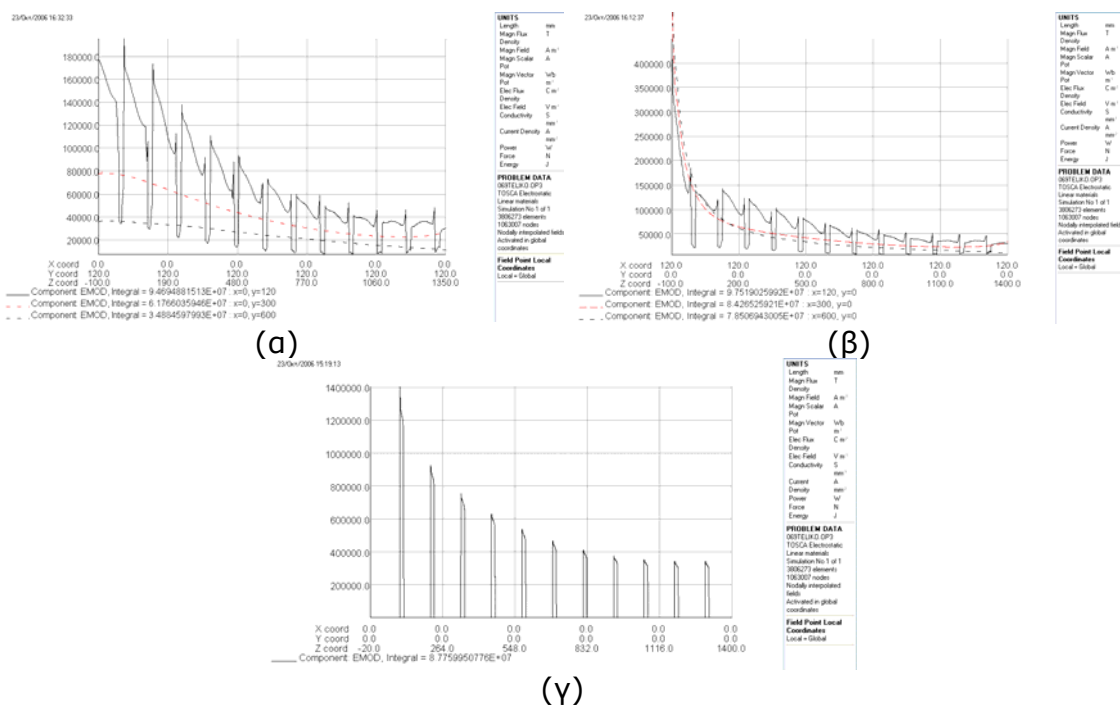
αγώγιμων μερών της αλυσίδας, γεγονός αναμενόμενο. Οι κορυφές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στην περιοχή της πορσελάνης του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα, καθώς έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη του μονωτήρα. Παρ' όλο που η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το δισκοειδή μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο δισκοειδή μονωτήρα, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της μέγιστης τιμής της έντασης στους δύο τελευταίους δισκοειδείς μονωτήρες, η οποία δικαιολογείται από την αύξηση της τάσης στους δύο αυτούς δισκοειδείς μονωτήρες, όπως φαίνεται από την κατανομή της τάσης (Σχήματα 3.9 και 3.11).

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων, και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα. Στο Σχήμα 3.12 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

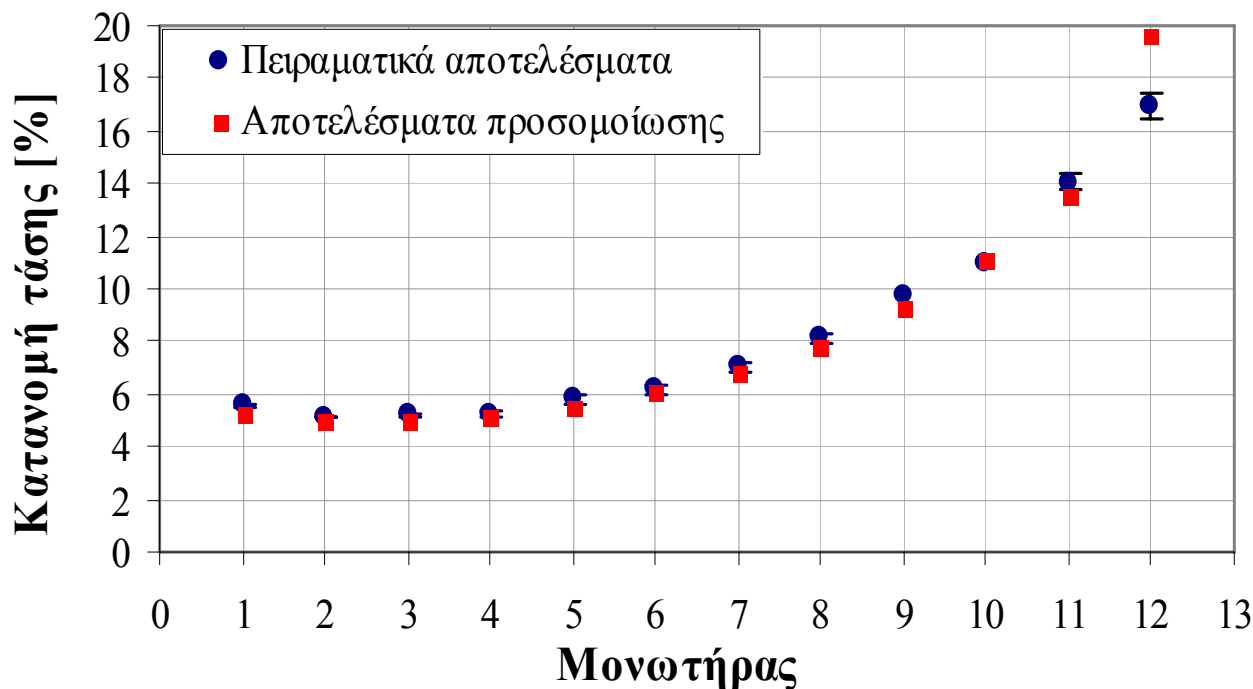
Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της τάσης προέκυψε ίσο με 4,49%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία A, Δ, E και ΣΤ είναι 7,18%, 8,31%, 4,88% και 6,79%, αντίστοιχα.



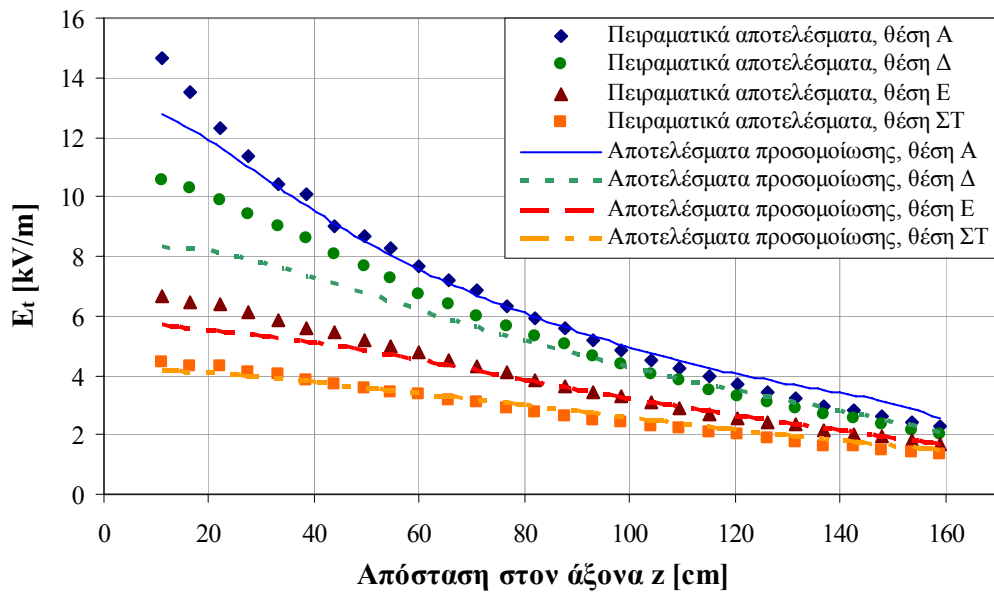
Σχήμα 3.9: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με
α) $X=0\text{mm}$ και $Y=0, 120, 300, 600\text{mm}$ και β) $Y=0\text{mm}$ και $X=0, 120, 300, 600\text{mm}$.



Σχήμα 3.10: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα με α) $X=0\text{mm}$ και $Y=120, 300, 600\text{mm}$, β) $Y=0\text{mm}$ και $X=120, 300, 600\text{mm}$, γ) $X=0\text{mm}$ και $Y=0\text{mm}$.



Σχήμα 3.11: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσσοειδή μονωτήρα 150kV, αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.



Σχήμα 3.12: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα 150kV, αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.

Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, και διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ αυτών, τόσο για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον, όπως αποδείχτηκε από τις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά στην περίπτωση επίλυσης της εξίσωσης ροής ρεύματος σε συνδυασμό με την εξίσωση Poisson.

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ

Για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους πυλώνες χρησιμοποιούνται αλυσοειδείς μονωτήρες. Ο αριθμός των δισκοειδών μονωτήρων, που απαρτίζουν την αλυσίδα, εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης της γραμμής μεταφοράς. Ένας αλυσοειδής μονωτήρας μπορεί να θεωρηθεί, σε μία πρώτη προσέγγιση, ότι αποτελείται από χωρητικότητες συνδεσμολογημένες εν σειρά, ο αριθμός των οποίων ταυτίζεται με τον αριθμό των δισκοειδών μονωτήρων. Με βάση την ανωτέρω υπόθεση, η επιβαλλόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα θα έπρεπε να ισομοιράζεται μεταξύ των δισκοειδών

μονωτήρων (ομοιόμορφη κατανομή), γεγονός που θα επέτρεπε την πλήρη εκμετάλλευση της διηλεκτρικής αντοχής των δισκοειδών μονωτήρων. Στην πράξη η κατανομή της τάσης κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα διαφέρει από την ομοιόμορφη κατανομή, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στις παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα ως προς γη και ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης [1]. Ο υπολογισμός των παράσιτων χωρητικοτήτων, καθώς και η προσπάθεια εξαλειψής τους αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών [9-12], λόγω της καταπόνησης άνω του μέσου όρου κάποιων δισκοειδών μονωτήρων της αλυσίδας, ενώ η καταπόνηση κάποιων άλλων δισκοειδών μονωτήρων είναι μικρότερη του μέσου όρου. Η απαίτηση για μεγαλύτερη αντοχή κάποιων δισκοειδών μονωτήρων, που απορρέει από την ανομοιόμορφη κατανομή της τάσης επί των αλυσοειδών μονωτήρων, οδηγεί σε αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής όλων των δισκοειδών μονωτήρων της αλυσίδας, γεγονός που αυξάνει το κόστος τους.

Εκτός από την επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων (πεδιακή προσέγγιση), οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες με χρήση γενετικού αλγορίθμου.

Ως κριτήριο σύγκλισης του γενετικού αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών για την κατανομή της τάσης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα:

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|V_{ci} - V_{mi}|}{V_{mi}} \quad (4.1)$$

όπου V_{mi} είναι η μετρούμενη τάση υπό την οποία καταπονείται ο i -οστός δισκοειδής μονωτήρας της αλυσίδας και V_{ci} είναι η υπολογιζόμενη τιμή της τάσης από τη σχέση:

$$V_{ci} = \frac{V}{(C_e + C_h) \cdot \sinh(n\gamma)} \cdot F_i \quad (4.2)$$

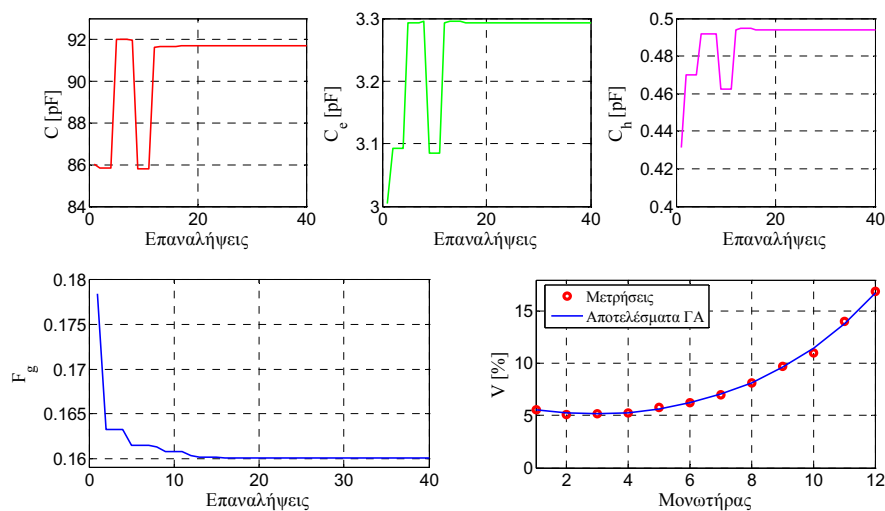
όπου C είναι η χωρητικότητα ενός δισκοειδούς μονωτήρα, C_e , C_h είναι οι παράσιτες χωρητικότητες της άρθρωσης μεταξύ δύο γειτονικών δισκοειδών μονωτήρων προς το γειωμένο πυλώνα και προς τον αγωγό υψηλής τάσης αντίστοιχα και

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_e + C_h}{C}} \quad (4.3)$$

$$F_i = C_e [\sinh(i\gamma) - \sinh[(i-1)\gamma]] - C_h [\sinh[(n-i)\gamma] - \sinh[(n-i+1)\gamma]] \quad (4.4)$$

Το κριτήριο τερματισμού πληρείται, εάν είτε η μέση τιμή της F_g στον πληθυσμό P_s μελών δεν βελτιώνεται περαιτέρω (ελαχιστοποίηση), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου, καθώς και η σύγκριση μεταξύ αυτών και των πειραματικών τιμών για αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.



Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης.

Με δεδομένο ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες συγκλίνουν ικανοποιητικά με τις πειραματικές τιμές, όπως φαίνεται στα Σχήμα 4.1, οδηγούμαστε στη σκέψη ότι ο γενετικός αλγόριθμος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Η γνώση του εύρους τιμών των χωρητικοτήτων συνεισφέρει στην προσπάθεια ισοκατανομής της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος των αλυσοειδών μονωτήρων, αφ' ενός μεν καθιστώντας δυνατό τον υπολογισμό των ορίων, εντός των οποίων λαμβάνει τιμές η τάση καταπόνησης ανά δισκοειδή μονωτήρα, αφ' ετέρου δε επιτρέποντας την επιλογή

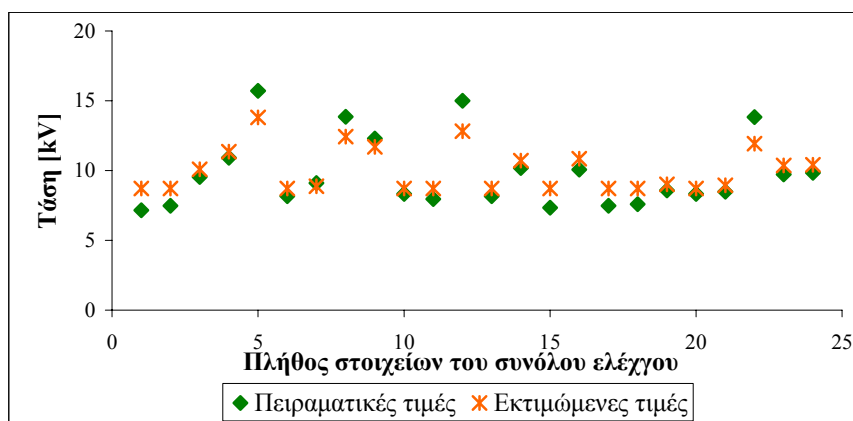
του καταλληλότερου και οικονομικότερου τρόπου βελτίωσης της αποδοτικότητας του μονωτήρα (π.χ. χρήση τοροειδούς, αύξηση του μεγέθους της οριζόντιας 'τραβέρσας' του πυλώνα, από την οποία αναρτώνται οι μονωτήρες, κ.λπ.).

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

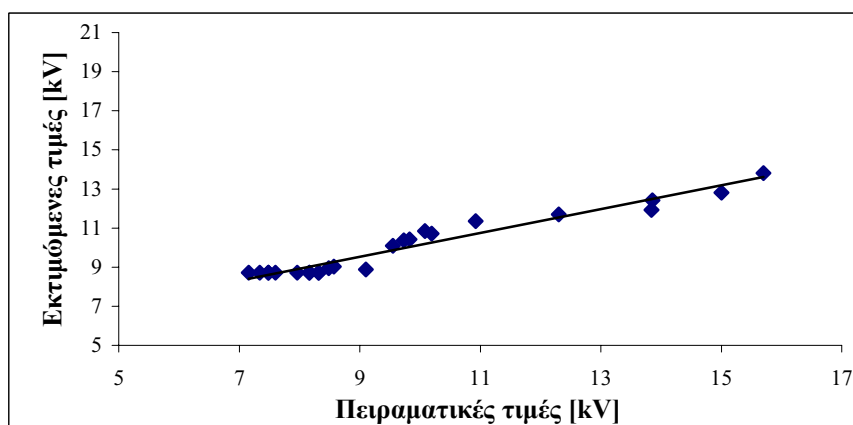
Ένα απ' τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε μονωτήρες Υψηλής Τάσης, όταν αυτοί λειτουργούν υπό συνθήκες ρύπανσης (βιομηχανικής ή θαλάσσιας), είναι η εμφάνιση του φαινομένου της υπερπήδησης. Συνεπώς, η γνώση των παραμέτρων, από τις οποίες εξαρτάται η υπερπήδηση, καθώς και των κρίσιμων τιμών αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Ο τρόπος, με τον οποίο καθεμιά από τις παραμέτρους αυτές συμβάλλει στην εμφάνιση του φαινομένου, δεν είναι γνωστός και η πολυπλοκότητα του φαινομένου εισάγει αβεβαιότητα, η οποία οδηγεί στην υιοθέτηση προσεγγίσεων. Στο σημείο αυτό τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και η Ασαφής Λογική αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα εργαλεία για την εκτίμηση και πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης. Προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης υλοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση τα ίδια δεδομένα εισόδου.

Όσον αφορά στη χρήση Ασαφούς Λογικής [13, 14], υλοποιήθηκαν διάφορες μεθοδολογίες για τη δημιουργία Ασαφών Συστημάτων. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν, όταν στη διαμόρφωση του αποτελέσματος συμμετείχαν δύο διαδοχικά τρίγωνα με βάση το σταθμισμένο μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση και το κέντρο του μεσαίου τριγώνου ορίζεται εξωτερικά με βάση τα διαστήματα που εισάγει ο χρήστης του προγράμματος. Η συσχέτιση για το σύνολο ελέγχου σε αυτήν την περίπτωση είναι 0,9714.

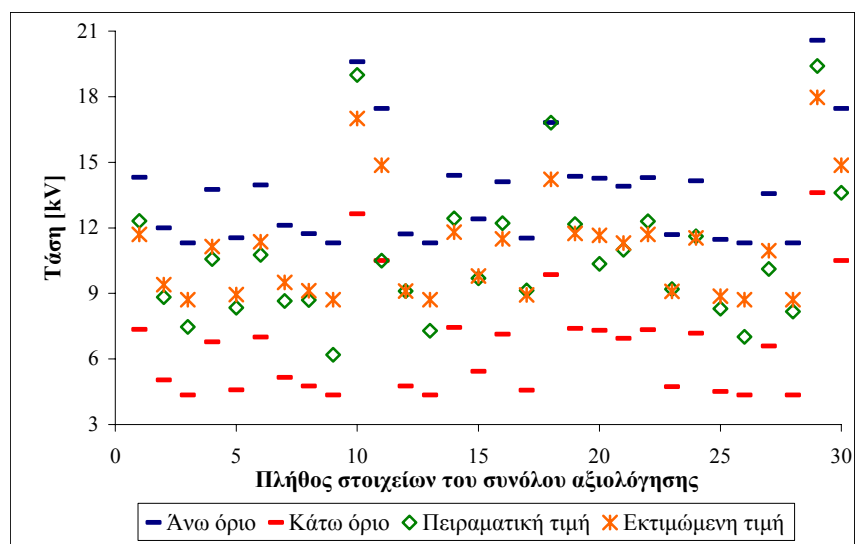
Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ασαφούς συστήματος για τα στοιχεία του συνόλου ελέγχου σε κοινό γράφημα με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.



Σχήμα 5.1: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.



Σχήμα 5.2: Συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.



Σχήμα 5.3: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.

Προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μεθοδολογίες των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος (δίκτυο επιβλεπόμενης μάθησης).

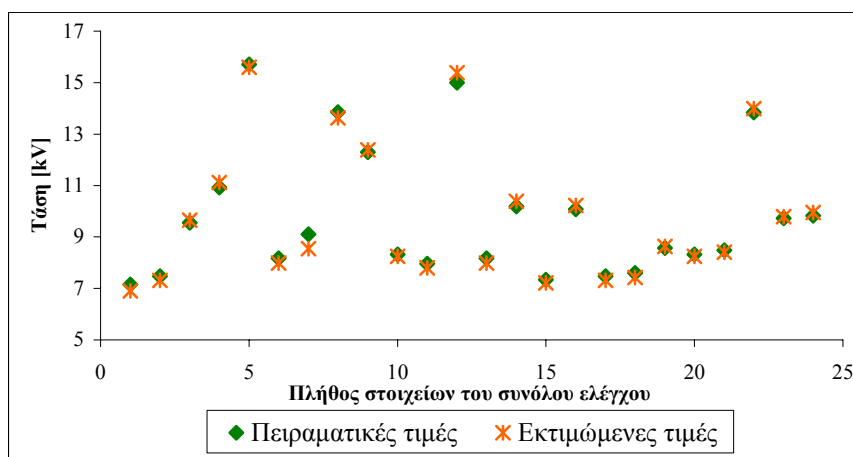
Αρχικά, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έτοιμες συναρτήσεις του MATLAB [15]. Παρ' ότι το συγκεκριμένο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο χρειάζεται μικρό υπολογιστικό χρόνο και είναι εύκολο στο χειρισμό, η αδυναμία ελέγχου των παραμέτρων του οδηγεί σε τιμές σφαλμάτων, οι οποίες είναι δυνατό να βελτιωθούν.

Για το λόγο αυτό υλοποιήθηκε αλγόριθμος, στον οποίο ήταν δυνατή η ρύθμιση όλων των παραμέτρων του. Για την εκπαίδευση των προτεινόμενων Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων εφαρμόστηκαν δώδεκα διαφορετικές μέθοδοι βελτιστοποιώντας κάθε φορά όλες τις παραμέτρους [16-18].

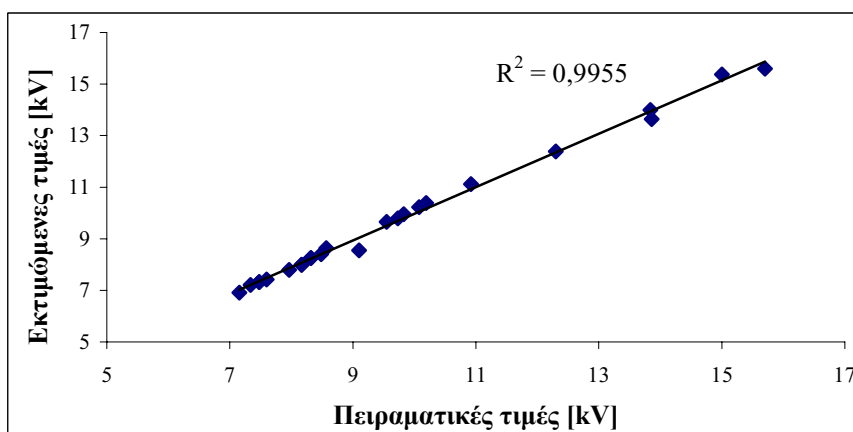
Μεταξύ των μεθόδων τυχαίας παρουσίασης των προτύπων εκπαίδευσης, τα καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 5.4) αποκτώνται κατά την εκπαίδευση ανά πρότυπο με χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής (φθίνουσες εκθετικές συναρτήσεις), όταν χρησιμοποιούνται ως κριτήρια τερματισμού:

- α) η μεταβολή στις τιμές των βαρών του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου από τη μία επανάληψη στην άλλη να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο,
- β) ο αριθμός των εποχών να μην ξεπερνά μία μέγιστη τιμή και
- γ) η μεταβολή στην τιμή της συνάρτησης σφάλματος από τη μία επανάληψη στην άλλη να είναι μικρότερη μίας προκαθορισμένης τιμής. Τότε, η συσχέτιση (Σχήμα 5.5) μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου είναι 0,9977.

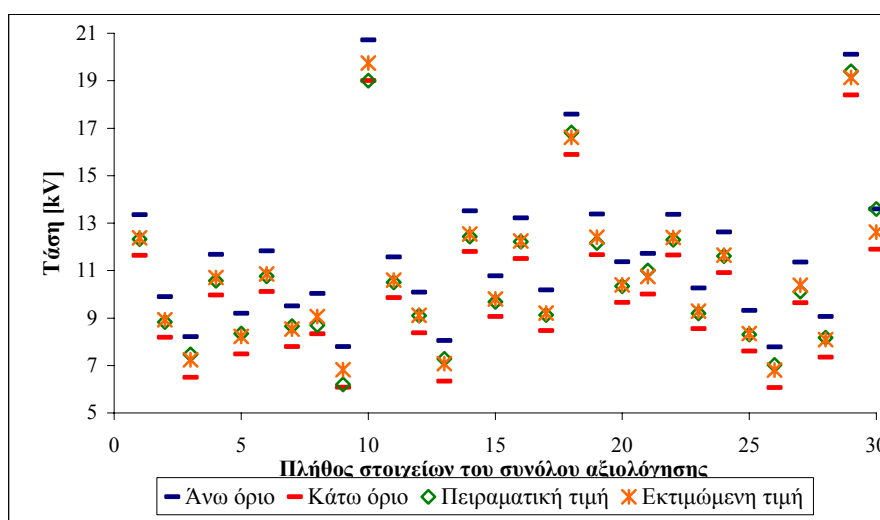
Στο Σχήμα 5.6 φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση η πειραματική τιμή και η εκτιμώμενη τιμή για τα δεδομένα του συνόλου αξιολόγησης, καθώς και το διάστημα εμπιστοσύνης με πιθανότητα ουράς ίση με 5%.



Σχήμα 5.4: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



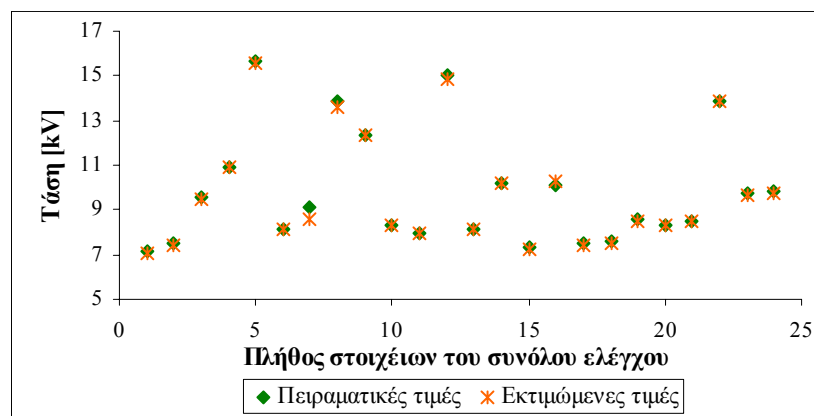
Σχήμα 5.5: Συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



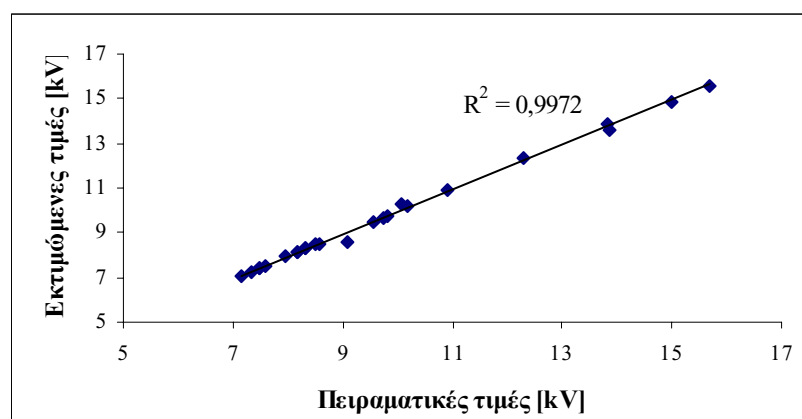
Σχήμα 5.6: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.

Μεταξύ των μεθόδων σειριακής παρουσίασης των προτύπων εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, όταν γίνεται χρήση και των τριών προαναφερθέντων κριτηρίων τερματισμού, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα με συσχέτιση (Σχήμα 5.8) μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου ίση με 0,9986, τιμή δηλωτική της πολύ καλής σύγκλισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών (Σχήμα 5.7).

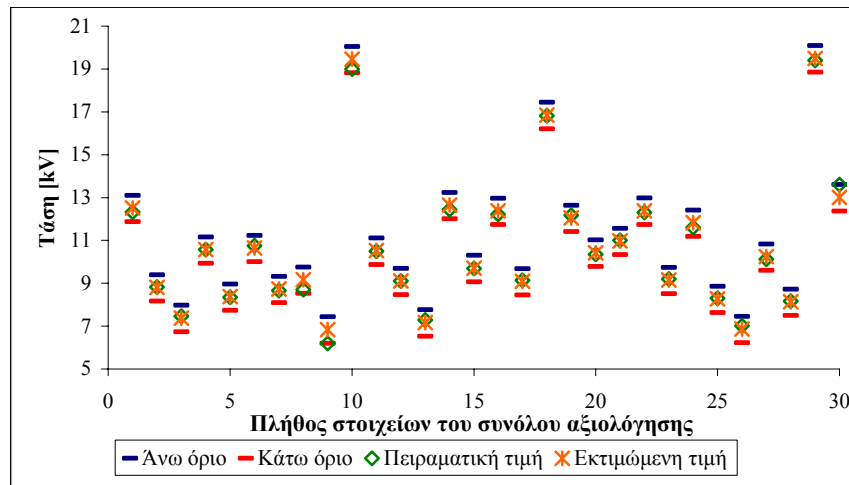
Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το διάστημα εμπιστοσύνης για το σύνολο αξιολόγησης με πιθανότητα ουράς ίση με 5%, απ' το οποίο προκύπτει ότι και σε αυτή την περίπτωση οι πειραματικές και οι εκτιμώμενες τιμές βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.



Σχήμα 5.7: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.8: Συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.9: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.

Εκ πρώτης απόψεως τα αποτελέσματα του Ασαφούς Συστήματος φαίνονται χειρότερα από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, αλλά παρ' όλα αυτά είναι συγκρίσιμα, καθώς και στις δύο περιπτώσεις είναι εντός των ορίων σφάλματος των πειραματικών μετρήσεων.

Συμπερασματικά, κρίνοντας, τόσο από την τιμή της συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου, όσο και από την τιμή των μέσων σφαλμάτων, είναι προφανές ότι το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, είναι δυνατό να εκτιμήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κρίσιμη τάση υπερπήδησης συγκρινόμενο τόσο με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, τα οποία στηρίζονται σε κάποιον από τους υπόλοιπους αλγορίθμους, όσο και με τα Ασαφή Συστήματα.

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Η πολυπλοκότητα, που παρουσιάζει το φαινόμενο της υπερπήδησης, οδήγησε πολλούς ερευνητές στην ανάπτυξη διάφορων μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν αδυναμίες, συνεπώς δεν δίνουν πάντα ακριβή αποτελέσματα. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ελέγχθηκε η αξιοπιστία μαθηματικών μοντέλων για μονωτήρες

μικρού μήκους ερπυσμού με μικρή ποσότητα ρύπανσης (μεγάλη αντίσταση ανά μονάδα μήκους) και για μονωτήρες μεγάλου μήκους ερπυσμού με μεγάλη ποσότητα ρύπανσης (μικρή αντίσταση ανά μονάδα μήκους).

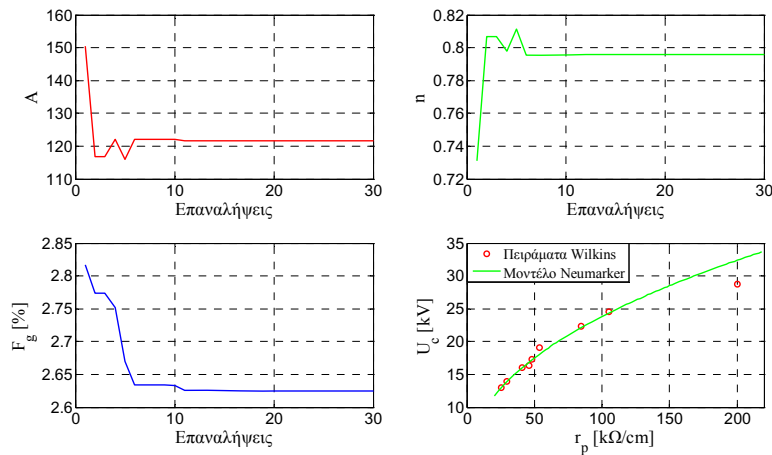
Για τον υπολογισμό των σταθερών A και n συνδυάστηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα (του Neumärker [19], των Dhab-Megrache και Beroual [20], των Hurley και Limbourn [19]) και τρεις διαφορετικές σειρές μετρήσεων (πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins [21], των Alston et al. [22] και του Cron [22]). Πραγματοποιώντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των προαναφερθέντων μοντέλων και πειραμάτων, ελέγχθηκε η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου. Ως κριτήριο ελέγχου της σύγκλισης χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του μέσου εκατοστιαίου σφάλματος F_g μεταξύ θεωρητικών $U_{c\theta}$ και πειραματικών τιμών $U_{c\mu}$:

$$F_g = 100 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|U_{c\theta,i} - U_{c\mu,i}|}{U_{c\mu,i}} \quad (6.1)$$

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου (A , n), το σφάλμα F_g , καθώς και η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων (χρησιμοποιώντας τις υπολογισθείσες από το γενετικό αλγόριθμο τιμές των A και n) και των πειραματικών τιμών για την κρίσιμη τάση U_c , ενώ οι βέλτιστες τιμές για τις σταθερές διάδοσης του τόξου A και n , που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο για κάθε περίπτωση, παρατίθενται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των σταθερών A και n .

Μοντέλο	Πείραμα	A	n	F_g [%]
Neumärker	Wilkins	121,755	0,796	2,624
	Alston et al.	419,071	0,356	1,044
	Cron	116,831	1,672	3,396
Dhabi-Megrache και Beroual	Wilkins	84,119	0,795	2,625
	Alston et al.	321,659	0,356	1,049
	Cron	24,552	1,669	3,389
Hurley και Limbourn	Wilkins	14,455	0,443	2,624
	Alston et al.	82,093	0,267	1,092
	Cron	6,202	0,620	3,427



Σχήμα 6.1: Υπολογισμός των μεγεθών A , n , F_g , U_c με χρήση του μοντέλου του Neumärker και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins (U_c).

Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στα υπάρχοντα μοντέλα και πειράματα, δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε μοντέλου, με κατάλληλη προσαρμογή στα A και n και, επιπλέον, υπαγορεύουν την ανάγκη κατηγοριοποίησης των μονωτήρων, ανάλογα με τη μορφή τους και τη βαρύτητα της ρύπανσης στην επιφάνειά τους, έτσι ώστε να ευρεθεί το κατάλληλο ζεύγος τιμών (A , n) ανά κατηγορία μονωτήρων και ρύπανσης.

Ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού (γενετικός αλγόριθμος) των σταθερών του τόξου είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε συνδυασμό μοντέλου και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγώντας σε ακριβή υπολογισμό των σταθερών του τόξου. Συνεπώς, ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου ανά κατηγορία μονωτήρων, οδηγώντας σε εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με ικανοποιητική ακρίβεια, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός γενικευμένου μοντέλου.

7. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ

Προκειμένου να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα συνδυάστηκαν πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων [23] και τεχνικές υψηλών τάσεων. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε προκειμένου να επιλεγεί ο βέλτιστος τύπος μονωτήρα που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα νέο δίκτυο μεταφο-

ράς υψηλής τάσης. Στην παρούσα εφαρμογή, η επιλογή έγινε ανάμεσα σε δέκα διαφορετικά είδη μονωτήρων τύπου cap and pin ($P_1 \dots P_{10}$), από τους οποίους ο καθένας έχει διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κριτήρια, με βάση τα οποία έγινε η επιλογή, ήταν:

- η διάμετρος,
- το μήκος ερπυσμού,
- η κρίσιμη τάση υπερπήδησης και
- το κόστος.

Η παραπάνω ομάδα κριτηρίων είναι συνεπής καθώς παρουσιάζει μονοτονία, επάρκεια και μη πλεονασμό (δηλαδή τα κριτήρια επαρκούν για τη λήψη απόφασης, χωρίς να πλεονάζουν και δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους). Συνεπώς, πληροί τις απαιτήσεις της πολυκριτηριακής θεωρίας προκειμένου να εφαρμοστεί η πολυκριτηριακή μέθοδος λήψης απόφασης. Τα βάρη των κριτηρίων είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση. Επειδή η επιλογή των βαρών είναι υποκειμενική, η επίλυση πραγματοποιήθηκε για έξι διαφορετικούς συνδυασμούς βαρών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Βέλτιστη επιλογή για διάφορους συνδυασμούς βαρών.

w_{c1}	w_{c2}	w_{c3}	w_{c4}	Επιλογή
1	1	1	1	P_3
1	1	1	2	P_3
1	2	3	4	P_3
2	3	1	4	P_3
2	2	1	1	P_7
4	3	2	1	P_7

Η επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή αποτελεί ένα πρόβλημα λήψης απόφασης, η οποία είναι απαραίτητο να βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια και να είναι κατά το δυνατό αντικειμενική. Η προτεινόμενη μεθοδολογία οδηγεί γρήγορα σε λύση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή μονωτήρων από εταιρείες ελαχιστοποιώντας την υποκειμενικότητα της απόφασης.

8. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης προκύπτει συσχετίζοντας τα εκτεθέντα στο τέλος κάθε ενότητας κυριότερα συμπεράσματά της με τις αντίστοιχες εργασίες άλλων ερευνητών, που ορίζουν το σημερινό επίπεδο γνώσεων στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί, ανακεφαλαιωτικά και εν συντομία, να συνοψιστεί στα ακόλουθα:

Πειραματική προσέγγιση

- Πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραμάτων για την εύρεση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε ρυπασμένους ή μη αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, καθώς και για την εύρεση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένους ή μη αλυσοειδείς μονωτήρες 150 kV και 400 kV. Οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συμβάλλουν σημαντικά στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων, αποδεικνύοντας την επίδραση του υλικού κατασκευής του μονωτήρα, του σχήματός του και της θέσης τοποθέτησής του. Η διεξαγωγή τους σε δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύει τη χρησιμότητά τους και αποτελεί συμβολή – πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής.
- Όσον αφορά στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, ο πλησιέστερος προς τον αγωγό υψηλής τάσης δισκοειδής μονωτήρας καταπονείται με μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης, σε σχέση με τους υπόλοιπους μονωτήρες, ενώ, σταδιακά, η καταπόνηση των δισκοειδών μονωτήρων μειώνεται πλησιάζοντας προς τον πυλώνα, πλην, όμως, το ποσοστό της επιβαλλόμενης τάσης στον πρώτο ή σε καθένα από τους δύο πρώτους δισκοειδείς μονωτήρες (πλησίον του πυλώνα) είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό του αμέσως επόμενου δισκοειδούς μονωτήρα. Αυτό οφείλεται στις τιμές, που λαμβάνουν οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης και τον πυλώνα στους δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του πυλώνα (αύξηση της C_e , μείωση της C_n , άρα η ανισότητα μεταξύ των δύο αυτών παρασίτων χωρητικότητων επιτείνει-

ται). Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα τείνει να γίνει πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή σε καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα. Αν και η επιδίωξη για ομοιόμορφη κατανομή φαίνεται να ικανοποιείται με την επικάθηση ρύπανσης, η ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών ισχύος, η μείωση της κρίσιμης έντασης και ο κίνδυνος ανωμαλιών καθιστούν, προφανώς, ανεπιθύμητη την ύπαρξη ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων.

- Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα όσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή της τάσης, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Όσον αφορά στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση από τον αγωγό υψηλής τάσης, είτε στο κάθετο, είτε στο οριζόντιο επίπεδο, οδηγεί σε μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι μετρήσεις αυτές συνέβαλαν στην επαλήθευση των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.
- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαφάνηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα τόσο στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, γεγονός το οποίο αποτέλεσε πολύτιμη πληροφορία για τη βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων, που ακολούθησαν. Ο αλυσοειδής μονωτήρας με τις μεγαλύτερες διαστάσεις εμφανίζει πιο ομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και, συνεπώς, μικρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Επίσης, ο μονωτήρας υάλου παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή, συγκρινόμενος με μονωτήρα πορσελάνης ιδίων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων για την κατανομή της τάσης και υπολογίστηκε η μέση τιμή και η διασπορά τους. Η μικρή διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων αποδεικνύει την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητά τους, αποτελεί δε ένδειξη, τουλάχιστον, για την ακρίβειά τους.
- Οι ληφθείσες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν αφ' ενός μεν για την επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση των αλυσοειδών μονωτήρων, αφ' ετέρου δε για την ανάπτυξη μίας νέας μεθοδολογίας υπολογισμού των παράσιτων χωρητικότητων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Πεδιακή προσέγγιση

- Προτάθηκαν και επιλύθηκαν δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια και αποτελούν αρωγό στην επιλογή του σωστού τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή. Η επίλυσή τους έγινε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστεί το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα.
- Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, η βελτιστοποίηση του τρόπου μοντελοποίησης μονωτήρων υψηλής τάσης. Προς επίτευξη τούτου, ελέγχθηκε η επίδραση του μεγέθους του περιβάλλοντα χώρου του μονωτήρα, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια θεωρήθηκε γειωμένη (άπειρη γη), αυξήθηκε κατάλληλα το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου και βελτιώθηκε ο τρόπος σχεδίασης του μοντέλου. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις αξιοποιήθηκε, επιπλέον, η αξονική συμμετρία, που παρουσιάζει ένας μονωτήρας.
- Η ανάγκη δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης προέκυψε από την αδυναμία προσομοίωσης σε δύο διαστάσεις μη συμμετρικών στοιχείων, συνδεδεμένων με το μονωτήρα (γραμμή μεταφοράς και πυλώνας). Παράλληλα, η σύγκριση μεταξύ δισδιάστατων, τρισδιάστατων μοντέλων και πειραματικών αποτελεσμάτων επέτρεψε τη διερεύνηση του σφάλματος που υπεισέρχεται από τη χρήση δισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης των μονωτήρων.
- Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των μοντέλων ο ηλεκτροστατικός επιλύτης, ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν την επιτρεπτότητα, αλλά αγνοεί την αγωγιμότητα των υλικών. Ο επιλύτης αυτός είναι δυνατό να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο με κατάλληλη προσαρμογή της τιμής της επιτρεπτότητας των μεταλλικών μερών του μονωτήρα, ενώ είναι ακατάλληλος για την προσομοίωση της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων. Η διαπίστωση της συγκεκριμένης αδυναμίας του ηλεκτροστατικού επιλύτη έγινε αποδεκτή από την εταιρεία ανάπτυξης του προγράμματος Opera, οδηγώντας την στη δημιουργία ενός νέου επιλύτη, ο οποίος στηρίζεται σε επαλληλία του ηλεκτροστατικού προβλήματος και του προβλήματος ροής φορτίου, δίνοντας τη

δυνατότητα προσδιορισμού των υλικών μέσω της επιτρεπτότητας και της αγωγιμότητάς τους. Ο συγκεκριμένος επιλύτης (lossy dielectrics) είναι διαθέσιμος μόνο για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων, ενώ στο άμεσο μέλλον θα είναι διαθέσιμος και για τρισδιάστατες προσομοιώσεις.

- Η αξιοπιστία των μοντέλων ενισχύεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα για την κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που προέκυψαν από το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες. Η σύγκλιση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα οδηγεί στη σκέψη ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ενός μονωτήρα, δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα. Παράλληλα, αποτελέσματα προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών, οι οποίοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο οριακών στοιχείων. Από τη σύγκριση αυτή διαπιστώθηκε η ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων, παρ' ότι η μεθοδολογία επίλυσης ήταν διαφορετική. Η διαδικασία δημιουργίας και βελτιστοποίησης των μοντέλων προσομοίωσης αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.

Μελέτη παρασίτων χωρητικότητων με χρήση πειραμάτων και γενετικού αλγορίθμου

- Με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες και τη χρήση γενετικού αλγορίθμου υπολογίσθηκαν οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς τον πυλώνα (γη) και ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης.
- Η (κύρια) χωρητικότητα C του μονωτήρα εξαρτάται, προφανώς και κυρίως, από το υλικό κατασκευής του, το μέγεθος και το σχήμα του, ενώ οι παράσιτες χωρητικότητες C_e και C_h επηρεάζονται σημαντικά από αντικείμενα ευρισκόμενα πλησίον του αλυσοειδούς μονωτήρα. Συνεπώς, για να γίνει εφικτός ο καθορισμός των τιμών των χωρητικότητων (κυρίας και παρασίτων) είναι απαραίτητο να κατηγοριοποιηθούν οι

μονωτήρες ανάλογα με τη μορφή και το υλικό κατασκευής τους και να διεξαχθούν πειράματα σε αυτούς. Με δεδομένο ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες συγκλίνουν ικανοποιητικά με τις πειραματικές τιμές, η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των χωρητικότητων (κυρίως και παρασίτων) μέσω γενετικού αλγορίθμου αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.

- Η γνώση του εύρους τιμών των χωρητικότητων ανά κατηγορία μονωτήρων καθιστά δυνατό τον υπολογισμό των ορίων, εντός των οποίων λαμβάνει τιμές η τάση καταπόνησης ανά δισκοειδή μονωτήρα, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη για τη σωστή διαστασιοποίηση της μόνωσης των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κυκλωματική – μαθηματική προσέγγιση

- Η υπερπήδηση αποτελεί ένα μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο είναι δυναμικό στην εξέλιξή του και επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας του μονωτήρα. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της υπερπήδησης καθιστά ανέφικτη τη δημιουργία ενός κυκλωματικού μοντέλου, που να εφαρμόζεται σε όλους τους μονωτήρες δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους. Η διαπίστωση της σημαντικής επίδρασης των σταθερών διάδοσης του τόξου (A, n) στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου οδήγησε στην ανάγκη υπολογισμού των σταθερών αυτών με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Οι βέλτιστες σταθερές διάδοσης του τόξου (A, n) επιλέχθηκαν, ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Το σφάλμα μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου, αποτελώντας στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.
- Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στα υπάρχοντα μοντέλα και πειράματα, δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε

μοντέλου, με κατάλληλη προσαρμογή στα A και n και, επιπλέον, υπαγορεύουν την ανάγκη κατηγοριοποίησης των μονωτήρων, ανάλογα με τη μορφή τους και τη βαρύτητα της ρύπανσης στην επιφάνειά τους, έτσι ώστε να ευρεθεί το κατάλληλο ζεύγος τιμών (A, n) ανά κατηγορία μονωτήρων και ρύπανσης.

- Ο γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποιήθηκε αφ' ενός μεν επιλέγοντας την κατάλληλη εξίσωση προσαρμογής (μεταξύ των συναρτήσεων απολύτου σφάλματος, σχετικού απολύτου σφάλματος, μεγίστου απολύτου σφάλματος και τετραγωνικού σφάλματος) για τη σύγκλιση, αφ' ετέρου δε ελέγχοντας τόσο τον αρχικό πληθυσμό, όσο και τους γονείς που συμμετέχουν στην αναπαραγωγή, με αποτέλεσμα να συγκλίνει σε μικρό αριθμό επαναλήψεων και με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης.
- Ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού (γενετικός αλγόριθμος) των σταθερών του τόξου είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε συνδυασμό μοντέλου και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγώντας σε ακριβή υπολογισμό των σταθερών του τόξου. Συνεπώς, ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου ανά κατηγορία μονωτήρων, οδηγώντας σε εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με ικανοποιητική ακρίβεια, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός γενικευμένου μοντέλου.

Έμπειρα συστήματα

- Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και τη ρύπανση. Προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, χρησιμοποιώντας, σε κάθε περίπτωση, τα ίδια δεδομένα εισόδου.
- Η συμβολή – πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής στην εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης έγκειται στη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, κατάλληλα διαμορφωμένων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Η διερεύνηση για την

εύρεση της βέλτιστης μεθόδου επεκτάθηκε, πέραν της χρήσης έτοιμων εργαλείων διαθέσιμων σε πακέτα λογισμικού, στην κατάλληλη τροποποίηση λογισμικού, η οποία επιτρέπει την πλήρη επέμβαση στις παραμέτρους του Νευρωνικού Δικτύου.

- Προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, ελέγχθηκε αφ' ενός μεν πλήθος τεχνικών εκπαίδευσης, τόσο τεχνητών νευρωνικών δικτύων, όσο και ασαφών συστημάτων, αφ' ετέρου δε δοκιμάστηκε πλήθος τιμών των παραμέτρων της κάθε μιας μεθόδου, με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, που είναι δυνατό να προκύψουν από την κάθε μέθοδο.
- Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις διάφορες μεθοδολογίες, προέκυψε ότι το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών, που επιτεύχθηκε από την επιλεχθείσα μέθοδο, κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικός, καθώς πλησιάζει τη μονάδα.
- Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων και των ασαφών συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα, που προέκυψαν από πειράματα διεξαχθέντα τόσο από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., όσο και από άλλους ερευνητές, γεγονός το οποίο διευρύνει το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης.

Επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα

- Η επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή αποτελεί ένα πρόβλημα λήψης απόφασης, η οποία είναι απαραίτητο να βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια και να είναι κατά το δυνατό αντικειμενική. Για την αποφυγή της υποκειμενικότητας, αναπτύχθηκε μία πολυκριτηριακή μεθοδολογία λήψης απόφασης για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα. Στη μέθοδο αυτή τα διάφορα κριτήρια ποσοτικοποιούνται, ενώ, παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον κριτηρίων.

9. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Κλείνοντας, παρατίθενται κάποιες σκέψεις, οι οποίες θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, στο πλαίσιο μίας ενδεχόμενης επέκτασης της παρούσας διατριβής.

Η δυνατότητα για ελεγχόμενες συνθήκες ρύπανσης καθιστά δυνατή τη μέτρηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για διάφορα επίπεδα ρύπανσης και διάφορα είδη μονωτήρων. Τα στοιχεία αυτά θα ήταν χρήσιμο να συμπεριληφθούν στο προτεινόμενο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, ώστε να αυξηθεί η ακρίβειά του και να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής του.

Η δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων στο πεδίο λειτουργίας των μονωτήρων θα επιτρέπει τη συλλογή πειραματικών αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των αλυσοειδών μονωτήρων, εξαλείφοντας ή εν πάση περιπτώσει ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα επίδρασης γειτονικών αντικειμένων στην ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων. Επίσης, η δυνατότητα μέτρησης της κατανομής της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου υπό συνθήκες φυσικής ρύπανσης θα οδηγήσει σε συμπεράσματα περί της συσχέτισης μεταξύ ρύπανσης αφ' ενός, και κατανομής τάσεως και εντάσεως αφ' ετέρου, ενώ παράλληλα θα επιτρέπει τη μοντελοποίηση της ρύπανσης.

Όπως αποδείχθηκε από τη διαδικασία προσομοίωσης των μονωτήρων, στα αποτελέσματα επιδρά σημαντικά η επιτρεπτότητα των υλικών. Το διάστημα τιμών της επιτρεπτότητας κάθε εμπορικά διαθέσιμου υλικού είναι αρκετά ευρύ, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ιδιαίτερη σύνθεση του κάθε εμπορικού υλικού ανάλογα με την εφαρμογή του. Η δυνατότητα χρήσης πειραματικών τιμών για την επιτρεπτότητα του κάθε υλικού θα βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Η διεξαγωγή πειραμάτων για εύρεση της τιμής της επιτρεπτότητας των εμπορικών υλικών, σε συνδυασμό με τη γνώση της ακριβούς εσωτερικής δομής των μονωτήρων, είναι δυνατό να επιτευχθεί, υπό την προϋπόθεση συνεργασίας με τις εταιρείες κατασκευής των μονωτήρων.

Τέλος, η ενσωμάτωση στο τρισδιάστατο πρόγραμμα προσομοίωσης Opera-3d του κατάλληλου επιλύτη για την ταυτόχρονη επίλυση του ηλεκτροστατικού προβλήματος και του προβλήματος ροής ρεύματος αναμένεται να γίνει από την εταιρεία υποστήριξης του λογισμικού. Η χρήση του θα μειώσει το σφάλμα των μοντέλων προσομοίωσης, ενώ θα είναι δυνατή η μοντελοποίηση της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων σε τρεις

διαστάσεις. Παράλληλα, είναι δυνατή η δημιουργία υβριδικών προγραμμάτων προσομοίωσης, τα οποία θα συνδυάζουν περισσότερες της μίας αριθμητικές μεθόδους επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] I.A. Σταθόπουλος, "Υψηλές Τάσεις Ι", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [2] IEC 60060-1, "High voltage test technique, Part 1: General Definitions and test requirements", November 1989.
- [3] IEC 60060-2, "High voltage test technique, Part 2: Measuring systems", November 1994.
- [4] PMM 8053A: System for the electromagnetic fields measurement, User's Manual, PMM 2004.
- [5] Vector Fields, "OPERA-2d Reference Manual", Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [6] K. Ikonou, G. Katsibokis, A. Kravaritis, I.A. Stathopoulos, "Cool fog tests on artificially polluted insulators", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, August 1987, Vol. II, paper 52.13.
- [7] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, "A model for the flashover process on non-uniformly polluted insulators", International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 22, No. 3, 2002, pp. 137-141.
- [8] Vector Fields, "OPERA-3d Reference Manual", Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [9] S.M. Al Dhalaan, M.A. Elhribawy, "Simulation of voltage distribution calculation methods over a string of suspension insulators", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, Texas, 7-12 September 2003, Vol. 3, pp. 909-914.
- [10] S.M. Al Dhalaan, M.A. Elhribawy, "Investigation on the characteristics of a string of insulator due to the effect of dirt", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, Texas, 7-12 September 2003, Vol. 3, pp. 915-920.

- [11] A.S.A. Farag, F.M. Zedan, T.C. Cheng, "Analytical studies of HV insulators in Saudi Arabia: Theoretical aspects", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 3, June 1993, pp. 379-391.
- [12] W. Sima, F.P. Espino-Cortes, Edward A. Cherney, Shesha H. Jayaram, "Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM based computational analysis", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 19-22 September 2004, pp. 480-483.
- [13] L.A. Zadeh, "Fuzzy Logic", IEEE Computer, April 1988, pp. 83-93.
- [14] Ch.N. Elias, G.J. Tsekouras, S. Kavatza, G.C. Contaxis, "A midterm energy forecasting method using Fuzzy Logic", WSEAS Transactions on Systems, Issue 5, Vol. 3, July 2004, pp. 2128-2135.
- [15] Matlab Help, Version 6.5
- [16] Σ.Γ. Τζαφέστας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Τόμος Α: Μεθοδολογίες, Αθήνα 2002.
- [17] Αριστείδης Λύκας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 1999.
- [18] G.J. Tsekouras, N.D. Hatziargyriou, E.N. Dialynas, "An Optimized Adaptive Neural Network for Annual Midterm Energy Forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006, pp. 385-391.
- [19] F.A.M. Rizk, "Mathematical models for pollution flashover", Electra, No. 78, October 1981, pp. 71-103.
- [20] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual, "Flashover dynamic model of polluted insulators under ac voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, April 2000, pp. 283-289.
- [21] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, March 1969, pp. 457-465.
- [22] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of discharges on polluted insulation", Proc. IEE, Vol. 110, No. 7, July 1963, pp. 1260-1266.
- [23] M. Rogers, M. Bruen, L.-Y. Maystre, "ELECTRE and Decision Support", Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1999.