



ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

cigré

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, SOLOMOU STR., 10682 ATHENS, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

ΣΥΝΟΛΟΣ “ΑΘΗΝΑ 2003” ΑΘΗΝΑ 27 & 28 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2003

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Α. Οικονόμου Δ.Π. Ηρακλέους Ι.Φ. Γκόνος Ι.Α. Σταθόπουλος¹
ΕΜΠ ΕΜΠ ΕΜΠ ΕΜΠ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για τον ακριβή υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η πρώτη βασίζεται σε αναλυτικές τεχνικές και μεθόδους και λαμβάνει υπόψη τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία των γραμμών, όσο και το φαινόμενο της αναστροφής διάσπασης. Η δεύτερη προσεγγίζει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, στα οποία, ως δεδομένα εισόδου και εξόδου, για να εκπαιδευθεί το μοντέλο, χρησιμοποιούνται πραγματικά κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία, ελληνικών εν λειτουργία γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εφαρμόζονται σε εν λειτουργία γραμμές των 150 kV και 400 kV του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρινόμενα τόσο μεταξύ τους, όσο και με πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα σφαλμάτων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού, κρίνονται άκρως ικανοποιητικά και αναδεικνύουν την ακρίβεια των προτεινόμενων μεθοδολογιών.

METHODS' DEVELOPMENT FOR CALCULATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

L. Ekonomou D.P. Iracleous I.F. Gonos I.A. Stathopoulos
NTUA NTUA NTUA NTUA

The paper proposes two methodologies for the lightning performance evaluation of high voltage transmission lines. The first one is based on conventional analytical techniques taking into consideration both shielding failures and backflashover rates. The second one uses artificial neural networks, where actual design and meteorological data collected from operating Hellenic high voltage transmission lines were used as input and output data in the network's training process. The proposed methodologies are applied on operating Hellenic transmission lines of 150 kV and 400 kV. The obtained results are compared between them and with real records of outage rate collected from the Public Power Company, showing a quite satisfactory agreement and certifying the accuracy of both methods.

¹ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Τηλ.: 2107723582, Fax: 2107723504.
email: leekonom@mail.ntua.gr iracleous@sitegenerator.gr igonos@ieee.org stathop@power.ece.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κεραυνοπληξία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης αποτελεί μία από τις συχνότερες αιτίες βλαβών και διακοπών στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην προσπάθεια να διατηρηθεί η υψηλή ποιότητα ισχύος και να αποφευχθούν ενδεχόμενες βλάβες και διαταραχές, πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως και διάφορες μεθοδολογίες έχουν προταθεί, αποσκοπώντας στον υπολογισμό και στη βελτίωση της κεραυνικής συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Ο Clayton και ο Young [1] ήταν από τους πρώτους ερευνητές που προσπάθησαν να εκτιμήσουν την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιώντας αναλογικά υπολογιστικά συστήματα βασισμένα σε γενικευμένες υπολογιστικές καμπύλες. Ο Anderson το 1961 [2] και στη συνέχεια οι Sargent και Darveniza [3], οι Darveniza, Popolansky και Whitehead [4], όπως επίσης και πολλοί άλλοι προσπάθησαν να επιλύσουν το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας μεθόδους προσομοίωσης Monte-Carlo. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μελέτη των Fisher, Anderson και Hagenguth [5], όπου μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υπό κλίμακα μοντέλα πύργων γραμμών μεταφοράς 345kV της Ηλεκτρικής Εταιρίας του Οχάιο, έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με υπολογισμούς των Lundholm, Finn και Price [6], χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που περιγράφεται με τις εξισώσεις Maxwell. Η μέθοδος των οδευόντων κυμάτων εισήχθη από τον Bewley [7] για τον υπολογισμό των υπερτάσεων σε πυλώνες γραμμών μεταφοράς. Τέλος, παρουσιάστηκε από τους Armstrong και Whitehead [8] το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της κατάληξης κεραυνικών εκκνώσεων. Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο στη συνέχεια μελετήθηκε, αναπτύχθηκε και τροποποιήθηκε από τους Young [9], Eriksson [10] και πολλούς άλλους ερευνητές. Αναπτύχθηκαν προγράμματα για ηλεκτρονικούς υπολογιστές που συμπεριλαμβάνουν τις προαναφερόμενες μεθοδολογίες και υποστηρίζουν τους απαραίτητους και πολύπλοκους υπολογισμούς που έχουν προταθεί από ομάδες εργασίας διεθνών οργανισμών [11, 12, 13].

Τα τελευταία χρόνια, πολύ προσοχή έχει δοθεί διεθνώς στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία και έχουν βρει πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές στην περιοχή των συστημάτων ισχύος [14, 15, 16], λόγω της υπολογιστικής τους ταχύτητας, της ικανότητάς τους να χειρίζονται σύνθετες μη γραμμικές συναρτήσεις, της σθεναρότητάς τους και της μεγάλης αποτελεσματικότητάς τους, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν πλήρεις πληροφορίες για το υπό μελέτη πρόβλημα.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για τον ακριβή υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων σε εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Η πρώτη μεθοδολογία βασίζεται σε αναλυτικές τεχνικές και μεθόδους και λαμβάνει υπόψη τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία των γραμμών, όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Η μεθοδολογία αυτή κωδικοποιείται ως ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, γραμμένο σε γλώσσα Visual Basic, ικανό να υποστηρίξει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς. Η δεύτερη μεθοδολογία προσεγγίζει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, όπου ως δεδομένα εισόδου και εξόδου, για να εκπαιδευθεί το μοντέλο, χρησιμοποιούνται πραγματικά κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία, ελληνικών εν λειτουργία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο μεθοδολογίες, στην προσπάθεια να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος, δεν χρησιμοποιούν στους υπολογισμούς μία μέση τιμή κατασκευαστικών και μετεωρολογικών στοιχείων για ολόκληρη την εξεταζόμενη γραμμή, αλλά λαμβάνουν υπόψη τους τα επιμέρους ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αλλά και τη μεταβολή τους κατά τη διάρκεια του έτους.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εφαρμόζονται σε εν λειτουργία γραμμές των 150 kV και 400 kV του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθοδολογίες, συγκρίνονται μεταξύ τους και με πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα σφαλμάτων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού, για τις γραμμές αυτές.

ΚΥΡΙΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Πρόσπτωση κεραυνών σε γραμμές μεταφοράς

Ως κεραυνική στάθμη T ορίζεται ο αριθμός των ημερών καταιγίδας ανά έτος και υπολογίζεται είτε από χάρτες ισοκεραυνικών καμπυλών, είτε από καταγεγραμμένα στοιχεία μετεωρολογικών σταθμών. Χρησιμοποιώντας την κεραυνική στάθμη T , η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και τετραγωνικό km N_g που πέφτουν στο έδαφος, όπως επίσης και ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν μία γραμμή ανά 100 km και έτος N_L δίνονται από τις εξισώσεις [11, 12]:

$$N_g = 0.04 \cdot T^{1.25} \quad (1)$$

$$N_L = 0.004 \cdot T^{1.35} \cdot (b + 4 \cdot h^{1.09}) \quad (2)$$

όπου: h το ύψος των αγωγών προστασίας σε m και b η οριζόντια απόσταση σε m ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας.

Κεραυνικές παράμετροι και χαρακτηριστικά

Οι κεραυνικές παράμετροι και χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται σ' αυτήν την εργασία, βασίζονται σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Berger στο Monte San Salvatore [17]. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του Berger το 85% των κεραυνικών εκκενώσεων θεωρούνται αρνητικοί, ενώ το 15% των κεραυνικών εκκενώσεων θεωρούνται θετικοί. Για να προσομοιωθούν οι κεραυνικές εκκενώσεις, κεραυνικές παράμετροι όπως η μέγιστη τιμή και η κλίση του κεραυνικού ρεύματος επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από στατιστικές κατανομές, χρησιμοποιώντας την ευρέως γνωστή τεχνική Monte-Carlo.

Το Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο

Το σημείο κατάληξης των κεραυνικών εκκενώσεων που πλήττουν μία γραμμή μεταφοράς, μπορεί να είναι ένας αγωγός φάσης, ένας αγωγός προστασίας, ο πυλώνας, ή ακόμα και το έδαφος. Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο, βασισμένο στην έννοια της «κρίσιμης απόστασης», έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει το σημείο πρόσπτωσης. Σύμφωνα με το [11], η κρίσιμη απόσταση r (σε m) δίνεται από τον τύπο:

$$r = 8.0 \cdot I^{0.65} \quad (3)$$

όπου: I είναι το πιθανολογούμενο κεραυνικό ρεύμα σε kA.

Αντίσταση Γείωσης Πυλώνα

Η αντίσταση γείωσης του πυλώνα υπολογίζεται, είτε σύμφωνα με τον τύπο (4), όταν πρόκειται για ομοιόμορφο έδαφος, είτε σύμφωνα με τον τύπο (5), όταν πρόκειται για διστρωματικό έδαφος [18].

$$R = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (4)$$

$$R = \left[0.53 \cdot \frac{\rho_2}{\sqrt{A}} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\frac{2 \cdot H}{\sqrt{A}}} + \frac{\rho_1}{L \cdot \sqrt[3]{m}} \right] \cdot \left[1 - 0.8 \cdot \left(\frac{100 \cdot h \cdot d}{\sqrt{A}} \right)^{0.25} \right] \quad (5)$$

όπου:

ρ, ρ_1, ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις σε $\Omega \cdot m$, μετρημένες σύμφωνα με τη μέθοδο του Wenner [19],

A το εμβαδόν που καταλαμβάνει το πλέγμα σε m^2 ,

P η περίμετρος του πλέγματος σε m,

L το συνολικό μήκος των αγωγών πλέγματος σε m,

d η διάμετρος των αγωγών του πλέγματος σε m,

h το βάθος τοποθέτησης του πλέγματος σε m,

H το βάθος του πρώτου στρώματος του εδάφους σε m,

$m = \sqrt{M} + 1$, όπου M ο αριθμός των τετραγώνων του πλέγματος.

Κεραυνικά σφάλματα γραμμών μεταφοράς

Το συνολικό κεραυνικό σφάλμα N_T μιας γραμμής μεταφοράς δίνεται από το άθροισμα των σφαλμάτων λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} και των σφαλμάτων λόγω ανάστροφης διάσπασης N_{BF} :

$$N_T = N_{SF} + N_{BF} \quad (6)$$

Τα σφάλματα λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} σχετίζονται με το ελάχιστο ρεύμα I_{min} , το οποίο απαιτείται για να προκληθεί διάσπαση της μόνωσης [12], και υπολογίζονται από την (7):

$$N_{SF} = N_L \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} f(I) dI \quad (7)$$

όπου:

I_{max} είναι το μέγιστο κεραυνικό ρεύμα σε kA,

I_{min} το ελάχιστο ρεύμα ίσο με: $2U_a / Z_{surge}$ [11],

U_a το επίπεδο μόνωσης της γραμμής μεταφοράς,

$f(I)$ η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας του ρεύματος,

Z_{surge} η κυματική σύνθετη αντίσταση του αγωγού σε Ω , ίση με: $60 \sqrt{\ln \frac{4h}{d} \cdot \ln \frac{4h}{D}}$ [12], όπου:

d/D η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού χωρίς / με το φαινόμενο corona.

Τα σφάλματα λόγω ανάστροφης διάσπασης N_{BF} , υπολογίζονται για την γραμμή μεταφοράς σύμφωνα με τη μέθοδο που αναπτύσσεται στο [20], από την εξίσωση:

$$N_{BF} = N_L \cdot \int_0^{\infty} P(\delta) d\delta \quad (8)$$

όπου:

$P(\delta)$ είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων της δ ,

δ μία βοηθητική μεταβλητή που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = R \cdot \frac{I_{peak}}{2} - 0.85 \cdot U_a + L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

I_{peak} η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος σε kA,

R η αντίσταση γείωσης του πυλώνα σε Ω ,

L η συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος σε μH ,

$\frac{di}{dt}$ η κλίση του κεραυνικού ρεύματος σε kA/ μs .

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αναπαριστά μία παράλληλη πολυστρωματική διάταξη επεξεργασίας πληροφοριών. Το χαρακτηριστικό στοιχείο αυτού του δικτύου είναι ότι λαμβάνει υπόψη του τη συσσωρευμένη γνώση που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και ανταποκρίνεται σε νέα γεγονότα, με τον πιο κατάλληλο τρόπο, αξιοποιώντας την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου καθορίζεται σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του δικτύου, τη συνάρτηση μεταφοράς και τον κανόνα εκμάθησης.

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό μοντέλο νευρωνικού δικτύου γνωστό με την ονομασία συμβατικό πολυστρωματικό μοντέλο perception (MLP). Το συμβατικό δίκτυο MLP αποτελείται από μη γραμμικές διαφορικές συναρτήσεις μεταφοράς. Κανόνες εκμάθησης ανάστροφης διάδοσης (BP) χρησιμοποιούνται για να ρυθμιστούν τα βάρη και οι όροι πόλωσης του δικτύου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνεχή αλλαγή των τιμών των βαρών και των όρων πόλωσης στην κατεύθυνση της καθόδου μεγίστης κλίσης (steepest descent) με αναφορά το σφάλμα [21].

Για να εκπαιδευθεί το δίκτυο, ένας ικανός αριθμός αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων του εν λόγω φαινομένου πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε το δίκτυο να μπορεί να μάθει τα βασικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Η εκπαίδευση ανάστροφης διάδοσης μπορεί να οδηγήσει σε ένα τοπικό παρά σε ένα ολικό ελάχιστο. Το τοπικό ακρότατο που θα βρεθεί μπορεί είτε να είναι ικανοποιητικό είτε σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να επιλεγεί ένα δίκτυο με περισσότερους νευρώνες και κρυμμένα στρώματα. Ωστόσο, ο αριθμός των νευρώνων και των επιπέδων που πρέπει να επιλεγούν δεν είναι φανερός. Γενικότερα η αρχιτεκτονική για ένα συμβατικό MLP αποφασίζεται δοκιμάζοντας ποικίλους συνδυασμούς κρυμμένων στρωμάτων και νευρώνων σε κάθε κρυμμένο στρώμα, επιλέγοντας εκείνη την αρχιτεκτονική η οποία έχει την καλύτερη συμπεριφορά ανάμεσα στους συνδυασμούς που δοκιμάστηκαν [22].

Αφού ολοκληρωθεί η εκπαιδευτική διαδικασία και καθοριστούν τα βάρη και οι όροι πόλωσης καθενός νευρώνα του νευρωνικού δικτύου, το επόμενο βήμα είναι να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης δοκιμάζοντας την αποτελεσματικότητα του δικτύου σε περιπτώσεις που συμπεριλήφθηκαν στην εκπαιδευτική διαδικασία και σε άλλες που δεν είχαν συμπεριληφθεί.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Ένα υπολογιστικό πακέτο κωδικοποιημένο σε γλώσσα Visual Basic αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς της προτεινόμενης μεθοδολογίας, που εκτιμά την κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς. Το λογισμικό είναι φιλικό για τον χρήστη, απλό και ευέλικτο σε αλλαγές και τροποποιήσεις. Έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει εκτός από τους τύπους πυλώνων, τα επίπεδα μονώσεων και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και λήφθηκαν υπόψη στην υπολογιστική διαδικασία, οποιαδήποτε αλλά χαρακτηριστικά. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε περιγράφεται ως εξής:

α) Εισαγωγή και αποθήκευση δεδομένων της γραμμής μεταφοράς. Γενικά χαρακτηριστικά όπως: οι διαστάσεις κάθε πυλώνα, οι διαστάσεις των αγωγών και οι αποστάσεις των πυλώνων εισάγονται στο υπολογιστικό εργαλείο μία φορά για όλη την γραμμή. Άλλα χαρακτηριστικά όπως: το ύψος των αγωγών φάσεως και των αγωγών προστασίας, οι γωνίες προστασίας και η μέση μηνιαία τιμή της αντίστασης γείωσης των πυλώνων εισάγονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα για κάθε μία περιοχή της γραμμής ξεχωριστά. Όσον αφορά στην αντίσταση γείωσης των πυλώνων, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα είτε να χρησιμοποιήσει την καταγεγραμμένη τιμή της ΔΕΗ [23],

είτε να την εκτιμήσει χρησιμοποιώντας την ειδική αντίσταση του εδάφους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης [18]. Στη συνέχεια εκτιμά τις μηνιαίες τιμές χρησιμοποιώντας αντίστοιχες μετρήσεις [24].

- β) Εισαγωγή και αποθήκευση της κεραυνικής στάθμης. Η κεραυνική στάθμη στην περιοχή της υπό εξέταση γραμμής εισάγεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα για κάθε ένα μήνα του έτους. Οι τιμές της κεραυνικής στάθμης έχουν διατεθεί από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [25].
- γ) Υπολογισμός του αριθμού των κεραυνών που πλήττουν την γραμμή. Αρχικά, το πρόγραμμα επιλέγει τυχαία το μήνα για τον οποίο η κεραυνική μελέτη πρόκειται να διεξαχθεί. Έπειτα υπολογίζεται ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν την γραμμή. Τέλος, οι κεραυνικές παράμετροι και χαρακτηριστικά επιλέγονται τυχαία από γνωστές στατιστικές κατανομές, βασισμένες στις μετρήσεις του Berger [17].
- δ) Προσδιορισμός του ακριβούς σημείου κατάληξης των κεραυνών, με εφαρμογή του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου. Αρχικά το πρόγραμμα επιλέγει τυχαία την περιοχή της γραμμής μεταφοράς για την οποία θα διεξαχθεί η κεραυνική μελέτη η οποία και θα χρησιμοποιήσει στους υπολογισμούς της τα συγκεκριμένα κατασκευαστικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά που υπάρχουν στην περιοχή. Έπειτα προσδιορίζεται το ακριβές σημείο πτώσης του κεραυνού (αγωγός φάσης, αγωγός προστασίας, έδαφος ή πυλώνας).
- ε) Υπολογισμός των σφαλμάτων λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας.
- στ) Υπολογισμός των σφαλμάτων λόγω αναστροφής διάσπασης. Πραγματοποιείται υπολογισμός των σφαλμάτων λόγω αναστροφής διάσπασης, διαχωρίζοντάς τα επίσης σε μονοφασικά και τριφασικά σφάλματα.
- ζ) Υπολογισμός των συνολικών σφαλμάτων.

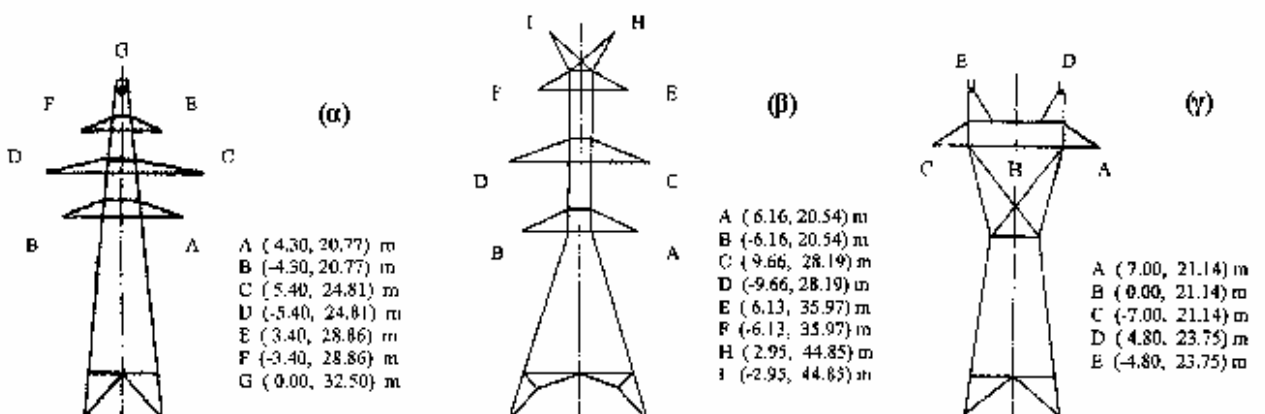
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Χαρακτηριστικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς

Τόσο η μεθοδολογία που βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, όσο και το λογισμικό που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκαν και ελέγχθηκαν σε εν λειτουργία γραμμές μεταφοράς των 150 kV και 400 kV του ελληνικού συστήματος. Οι γραμμές επιλέχθηκαν πολύ προσεχτικά ανάμεσα σε άλλες, λόγω: α) του υψηλού αριθμού σφαλμάτων που παρουσιάζουν κατά την διάρκεια καταιγίδων [23], β) την ομοιόμορφη κατασκευή τους για τουλάχιστον 90% του μήκους τους και γ) του ικανοποιητικού μήκους τους και του ικανοποιητικού χρόνου λειτουργίας τους έτσι ώστε να παρουσιάζουν μία εύλογη έκθεση στους κεραυνούς.

Η πρώτη γραμμή ονομάζεται Άραχος-Αχελώος και είναι μία γραμμή 150 kV μήκους 70.300 km. Περιλαμβάνει ένα διπλό κύκλωμα με ένα αγωγό προστασίας (σχήμα 1α). Η γραμμή έχει 192 πυλώνες με μέση απόσταση μεταξύ γειτονικών πυλώνων 370 m. Το επίπεδο μόνωσης U_a της γραμμής είναι 750 kV και οι διαστάσεις του αγωγού φάσης είναι ACSR 636 MCM.

Η δεύτερη γραμμή ονομάζεται Θεσσαλονίκη-Καρδιά και είναι μία γραμμή 400 kV μήκους 109.908 km. Περιλαμβάνει ένα διπλό κύκλωμα με δύο αγωγούς προστασίας (σχήμα 1β). Η γραμμή έχει 305 πυλώνες με μέση απόσταση μεταξύ γειτονικών πυλώνων 360 m. Το επίπεδο μόνωσης U_a της γραμμής είναι 1550 kV και οι διαστάσεις του αγωγού φάσης είναι ACSR 954 MCM.



Σχήμα 1: Οι Πυλώνες των υπό ανάλυση 150 kV και 400 kV Γραμμών Μεταφοράς

Η τρίτη γραμμή ονομάζεται Κυκλίκις-Σέρρες και είναι μία γραμμή 150 kV μήκους 58.068 km. Περιλαμβάνει ένα μονό κύκλωμα με δύο αγωγούς προστασίας (σχήμα 1γ). Η γραμμή έχει 162 πυλώνες με μέση απόσταση μεταξύ γειτονικών πυλώνων 358 m. Το επίπεδο μόνωσης U_a της γραμμής είναι 750 kV και οι διαστάσεις του αγωγού φάσης είναι ACSR 336.4 MCM.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση γραμμών μεταφοράς [23, 25]

Γραμμή	Περιοχή	Πυλώνες	R (Ω) (Μέση τιμή περιοχής)	N _T (Μέσος αριθμός κεραυνικών σφαλμάτων 1996-2000)	T (Μέση κεραυνική στάθμη 1996-2000)
Αραχθος-Αχελώος	I	1 - 70	3.00	1.40	44.8
	II	71 - 130	3.12	1.40	40.7
	III	131 - 192	3.56	1.60	41.3
Θεσσαλονίκη-Καρδιά	I	1 - 195	1.93	0.60	32.2
	II	196 - 260	8.83	1.40	29.6
	III	261 - 305	18.24	1.80	30.4
Κιλκίς-Σέρρες	I	1 - 46	1.99	0.60	31.8
	II	47 - 106	4.40	1.80	29.2
	III	107 - 162	1.78	0.80	27.7

Κάθε μία από αυτές τις τρεις γραμμές μεταφοράς χωρίζεται σε τρεις περιοχές λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και των διαφορετικών μέσων τιμών αντίστασης γείωσης πυλώνων που υπάρχουν σε κάθε μία από αυτές τις περιοχές. Οι περιοχές και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που υπάρχουν σε κάθε μία από τις τρεις γραμμές παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου

Για την ανάπτυξη του νευρωνικού δικτύου που υπολογίζει την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, η αντίσταση γείωσης του πυλώνα R , η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος I_{peak} , η κλίση του

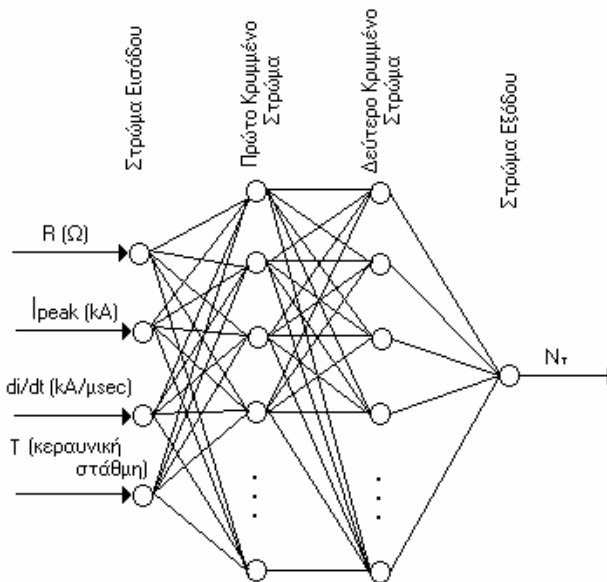
κεραυνικού ρεύματος $\frac{di}{dt}$ και η κεραυνική στάθμη T ορίστηκαν ως οι είσοδοι του νευρωνικού δικτύου. Ως έξοδος του

νευρωνικού δικτύου ορίστηκε ο αριθμός των κεραυνικών σφαλμάτων της γραμμής N_T . Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα παραπάνω δεδομένα εισόδου - εξόδου αναφέρονται σε κάθε ένα ξεχωριστό μήνα μιας περιόδου πέντε ετών και αποτελούν είτε πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, είτε εκτιμώμενα γεγονότα, βασισμένα σε πραγματικές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των κεραυνικών σφαλμάτων της γραμμής έχει γνωστοποιηθεί από την ΔΕΗ [23], ενώ η κεραυνική στάθμη έχει διατεθεί από την ΕΜΥ [25]. Η αντίσταση γείωσης του πυλώνα, έχει εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος γείωσης και τις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [18, 24]. Τέλος το μέγιστο κεραυνικό ρεύμα και η κλίση του κεραυνικού ρεύματος εκτιμώνται χρησιμοποιώντας τις κεραυνικές στατιστικές κατανομές παραμέτρων και χαρακτηριστικών, που παρουσιάστηκαν από τον Berger, σε συνδυασμό με τα γεωγραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα της υπό εξέτασης περιοχής.

Έχοντας αποφασίσει τον αριθμό των εισόδων και εξόδων του δικτύου, το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί ο αριθμός των κρυμμένων στρωμάτων και ο αριθμός των νευρώνων σε κάθε στρώμα. Δοκιμάζοντας ποικίλους συνδυασμούς κρυμμένων στρωμάτων και αριθμού νευρώνων σε κάθε κρυμμένο στρώμα, επιλέχθηκε εκείνη η αρχιτεκτονική η οποία παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά. Αποφασίστηκε, λοιπόν, να χρησιμοποιηθεί ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο με τέσσερα στρώματα εισόδου, δύο κρυμμένα στρώματα, το καθένα αποτελούμενο από δέκα νευρώνες, και ένα στρώμα εξόδου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.

Η εργαλειοθήκη νευρωνικών δικτύων του προγράμματος MATLAB [22] χρησιμοποιήθηκε για να εκπαιδευθεί το δίκτυο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση "trainlm" η οποία συγκλίνει σε λιγότερο χρόνο και έπειτα από λιγότερες επαναλήψεις συγκρινόμενη με τη συνάρτηση μεταφοράς "trainbpx" της εργαλειοθήκης νευρωνικών δικτύων. Κάθε επανάληψη αναπαριστά ένα σύνολο διανυσμάτων εκπαίδευσης του δικτύου, για τον υπολογισμό νέων βαρών και όρων πόλωσης. Η συνάρτηση μεταφοράς "trainlm", είναι μία μέθοδος ανάστροφης διάδοσης βασισμένη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt [26], η οποία είναι πιο πολύπλοκη και βελτιωμένη από τη μέθοδο καθόδου μέγιστης κλίσης, αλλά απαιτεί περισσότερη υπολογιστική μνήμη. Παρόλο που η συνάρτηση μεταφοράς "trainlm" απαιτεί σημαντική μνήμη, με τη σημερινή τεχνολογία αυτό δεν αποτελεί, πλέον, μειονέκτημα.

Εκατόν ογδόντα τιμές για κάθε ένα δεδομένο εισόδου και εξόδου, που αφορούν κάθε μία από τις περιοχές της γραμμής, για κάθε ένα ξεχωριστό μήνα μιας περιόδου πέντε ετών, χρησιμοποιήθηκαν για να εκπαιδευθεί το δίκτυο (καθορισμός βαρών και όρων πόλωσης καθενός νευρώνα του νευρωνικού δικτύου). Η διαδικασία εκπαίδευσης επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί σφάλμα 1%. Τέλος ο αριθμός των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων της υπό εξέταση γραμμής μεταφοράς ελέγχεται συγκρινόμενος με τον αριθμό σφαλμάτων που υπολογίστηκε από περιπτώσεις που συμπεριλήφθηκαν στην εκπαιδευτική διαδικασία (περίοδο πέντε ετών) και άλλες που δεν είχαν συμπεριληφθεί.



Σχήμα 2: Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου τεχνητού νευρωνικού δικτύου

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τον μέσο αριθμό καταγεγραμμένων ετήσιων κεραυνικών σφαλμάτων [23] των υπό εξέταση γραμμών, όπως επίσης και τον μέσο ετήσιο αριθμό κεραυνικών σφαλμάτων, που υπολογίστηκε σύμφωνα με το προτεινόμενο υπολογιστικό πρόγραμμα και τον μέσο ετήσιο αριθμό κεραυνικών σφαλμάτων που υπολογίστηκε σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα αποτελέσματα των δύο προτεινόμενων μεθοδολογιών είναι πολύ κοντά με τα πραγματικά κεραυνικά σφάλματα, κάνοντας έτσι φανερό ότι οι μεθοδολογίες αυτές λειτουργούν και παρουσιάζουν καλή ακρίβεια.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα προτεινόμενων μεθοδολογιών

Γραμμή	Αραχθος-Αχελώος			Θεσσαλονίκη-Καρδιά			Κιλκίς-Σέρρες		
Έτη	Καταγεγραμμένα Κεραυνικά Σφάλματα	Κεραυνικά Σφάλματα Υπολογιστικού Προγράμματος	Κεραυνικά Σφάλματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	Καταγεγραμμένα Κεραυνικά Σφάλματα	Κεραυνικά Σφάλματα Υπολογιστικού Προγράμματος	Κεραυνικά Σφάλματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	Καταγεγραμμένα Κεραυνικά Σφάλματα	Κεραυνικά Σφάλματα Υπολογιστικού Προγράμματος	Κεραυνικά Σφάλματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων
1996-2000	4.40	4.79	4.16	3.80	3.48	3.51	3.20	3.27	3.34
2001	5.00	4.90	5.23	4.00	4.47	4.18	3.00	2.68	2.30

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία παρουσιάζει δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η πρώτη μεθοδολογία αναφέρεται σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα κωδικοποιημένο σε γλώσσα Visual Basic βασισμένο σε αναλυτικές τεχνικές και μεθόδους που λαμβάνει υπόψη τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία των γραμμών, όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Η δεύτερη μεθοδολογία προσεγγίζει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Χρησιμοποιείται μία συμβατική πολυστρωματική τεχνική perceptron βασισμένη στη μέθοδο της ανάστροφης διάδοσης. Ως δεδομένα εισόδου και εξόδου, για να εκπαιδευθεί το μοντέλο, εισάγονται πραγματικά κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία, εν λειτουργία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Οι δύο μεθοδολογίες εφαρμόζονται σε γραμμές των 150 kV και 400 kV του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δίνοντας αποτελέσματα πολύ κοντά με τα πραγματικά στοιχεία. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας, ως ένα χρήσιμο εργαλείο στη σχεδίαση και την κατασκευή συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τόσο τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, όσο και την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για την παροχή των απαραίτητων τεχνικών και μετεωρολογικών δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. M. Clayton, F. S. Young, "Estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 83, 1964, pp. 1102-1110
- [2] J. G. Anderson, "Monte Carlo computer calculation of transmission-line lightning performance", AIEE Transactions, Vol. 80, 1961, pp. 414-420
- [3] M.A. Sargent, M. Darveniza, "Lightning Performance of Double - Circuit Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Vol. 89, 1970, pp. 913-925
- [4] M. Darveniza, F. Popolansky, E.R. Whitehead, "Lightning Protection of UHV Lines", Electra, No.41, 1975, pp. 39-69
- [5] F.A. Fisher, J.G. Anderson, J.H. Hagenguth, "Determination of Lightning Response of Transmission Lines by Means of Geometrical Models". AIEE Trans. on PAS, Vol. 78, 1960, pp. 1725-1736
- [6] R. Lundholm, R.B. Finn, W.S. Price, "Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts". AIEE Trans. on PAS, Vol. 77, February 1958, pp. 1271-1283
- [7] L.V. Bewley, "Travelling Waves on Transmission Systems", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. N.Y., 1951
- [8] H.R. Armstrong, E.R. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, 1968, pp. 270-281
- [9] F.S. Young, J.M. Clayton & A.R. Hileman, "Shielding of Transmission Lines", IEEE Trans, Vol.82, 1963, pp.132-154
- [10] A.J. Eriksson, "An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis", IEEE Trans. PWRD, Vol. 2, 1987, pp. 871-886
- [11] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. on PAS, Vol. 104, No. 4, 1985, pp. 919-927
- [12] IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models", IEEE Trans. on PAS, Vol. 8, No. 3, 1993, pp. 1254-1267
- [13] CIGRE "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", WG 01 (Lightning) of SC 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), 1991
- [14] D.V. Coury, D.C. Jorge, "Artificial Neural Network Approach to Distance Protection of Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, 1988, pp. 102-108
- [15] D. Novosel, B. Bachmann, D. Hart, Y. Hu, M.M. Saha, "Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, 1996, pp. 1728-1736
- [16] T.S. Sidhu, H. Singh and M.S. Sachdev, "Design, Implementation and Testing of an Artificial Neural Network based Fault Direction Discrimination for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 1995, pp. 697-706
- [17] K. Berger, R.B. Anderson, H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes", Electra, No. 41, 1975, pp. 23-37
- [18] J. Nahman, D. Salamon, "Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil", IEEE Trans on PAS, Vol. 103, No. 4, 1984
- [19] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983
- [20] I.F. Gonos, L. Ekonomou, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, "Probability of backflashover in transmission lines due to lightning strokes using Monte-Carlo simulation", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, Issue 2, 2003, pp. 107-111
- [21] R. Lippmann, "An introduction to computing with neural nets" IEEE ASSP Magazine, Vol.4, No.2, 1987, pp.4-22
- [22] H. Demuth, M. Beale, "Neural Network Toolbox: For use with MATLAB". The Math Works, 1994
- [23] ΔΕΗ, "Ετήσια έκθεση δραστηριότητας", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Αθήνα, 2002
- [24] Ι. Φ. Γκόνοϋ, "Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002
- [25] Data supplied from the National Meteorological Authority of Hellas
- [26] MT Hagan, MB. Menhaj, "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm". IEEE Trans on Neural Networks, Vol 5, 1994, pp. 989-993