

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος **Εργαστήριο Υψηλών Τασεώ**ν

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΛΑΜΠΡΟΥ Σ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

Επιβλέπων: Καθηγητής Ι.Α. Σταθόπουλος

Αθήνα, Μάιος 2006

στην Εύα



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Λάμπρος Σ. Οικονόμου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Περικλής Δ. Μπούρκας

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Ιωάννης Σταθόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευργγελος Διαλυνάς Καθηρητής Ε.Μ.Π.

Περικλής Μπούρκας Καθηγητης Ε.Μ.Π.

myran Ανδρέας Σταφυλοπάτης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημοσθένης Αγορής Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πατρών

A011va 22 Maiou 2006

Φραγκίσκος Τοπαλής Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Κορρές Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

/

Λάμπρος Σ. Οικονόμου Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Λάμπρος Σ. Οικονόμου, 2006 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς και τη σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης (ΓΜΥΤ) αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων σε αυτές. Αναπτύσσεται μία νέα αναλυτική-πιθανοτική μεθοδολογία που υπολογίζει τα σφάλματα ΓΜΥΤ βελτιώνοντας και επεκτείνοντας προηγούμενες μελέτες, διαχωρίζοντας για πρώτη φορά τις γραμμές σε περιοχές και διεξάγοντας την ανάλυση για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτών. Επιπλέον χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς μηνιαίες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων και κεραυνικής στάθμης κάνοντας εμφανή τη μεγάλη σημασία που έχει η μεταβολή των παραμέτρων αυτών στην κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς. Με βάση τη μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα Η/Υ (λογισμικό) για να εξυπηρετήσει τους πολλούς και περίπλοκους υπολογισμούς της.

Στη συνέχεια προτείνεται μία νέα μεθοδολογία για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς ΓΜΥΤ, ανεξάρτητη από τις μέχρι σήμερα διεθνής ερευνητικές προσπάθειες, η οποία χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ). Η μεθοδολογία απαγκιστρώνεται από τις έως σήμερα εμπειρικές και προσεγγιστικές εξισώσεις και παραδοχές και βασίζεται μόνο σε πραγματικά στοιχεία και παραμέτρους των ΓΜΥΤ, που κατέχουν μείζονα ρόλο στην ύπαρξη και δημιουργία των κεραυνικών σφαλμάτων. Οι παράμετροι και τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί το ΤΝΔ και να αποκτήσει εκείνη την απαραίτητη γνώση, έτσι ώστε κατάλληλα να μπορεί να ανταποκριθεί σε νέα γεγονότα.

Τέλος παρατίθεται μια νέα μεθοδολογία σχεδίασης ΓΜΥΤ που προτείνει εκείνες τις βέλτιστες τιμές των κατασκευαστικών παραμέτρων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των γραμμών ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κεραυνικά σφάλματα. Σημαντικό σημείο στη μεθοδολογία αυτή αποτελεί το γεγονός ότι η γενικότερη τυποποίηση που ακολουθούν οι ηλεκτρικές εταιρίες σε σχέση με τη σχεδίαση των γραμμών μεταφοράς παραμένει αμετάβλητη, αφού τα μόνα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται είναι το επίπεδο μόνωσης των γραμμών και η αντίσταση γείωσης πύργων.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εφαρμόζονται σε ελληνικές ΓΜΥΤ συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν, τόσο με αυτά άλλης από τη διεθνή βιβλιογραφία μεθοδολογίας, όσο και με τις πραγματικές καταγεγραμμένες τιμές κεραυνικών σφαλμάτων.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση, Αντικεραυνική Προστασία, Απευθείας Κεραυνοπληξία, Βέλτιστες Μέθοδοι Σχεδίασης, Βελτιστοποίηση, Δίκτυα Ακτινικής Συνάρτησης Βάσης, Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς, Κεραυνική Συμπεριφορά, Πολυστρωματικό Perceptron, Υπολογιστικό Πακέτο, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Summary

In this thesis are analyzed the lightning performance evaluation and the design of high voltage transmission lines aimed at the minimization of the lightning failures. A new analytical-probabilistic method is developed, which improves and extends former studies dividing for first time the transmission lines into regions, conducting the analysis separately for each region, taking into consideration the individual characteristics of each one of them. This technique is particular useful for lines similar with these of the Hellenic interconnected system which run at the same time through a plain region, a coastline and/or a mountainous region. Furthermore in the calculations are used monthly tower footing resistance values and monthly values of keraunic level, in contrast to the yearly average values which are used in other methods, making clear the importance of these parameters' variation in the lightning performance of transmission lines. Based on this methodology a software tool has been developed in order to facilitate all the necessary calculations.

Then another new methodology totally independent from the up today worldwide research efforts is proposed for the lightning performance evaluation of high voltage transmission lines which uses artificial neural networks. Following this approach the methodology is not depending on empirical and approximating equations, but is based only on actual collected transmission line data, which play important role in the existence of lightning failures. These data are used in order the artificial neural network to be developed, to consider the accumulated knowledge and to respond to new events in the most appropriate manner.

Finally a new design methodology is presented for the high voltage transmission lines, which proposes the optimal design parameter values that must be used during the construction, in order to reduce the failure rates caused by lightning. Key issue of this methodology is the fact that the general standardization which is followed by the electric utilities stands unchangeable, since the only two design parameters which can be change are the insulation level and the tower footing resistance.

The proposed methodologies are applied on operating Hellenic transmission lines of 150 kV and 400 kV, comparing the results with the results produced by another software tool published in the technical literature and with the real records of outage rate.

Keywords

Artificial Neural Networks, Backflashover, Design Engineering, Lightning Performance, Lightning Protection, Multi Layer Perceptron, Optimal Design Method, Optimization, Radial Basis Function Networks, Shielding Failures, Software Tool, Overhead Transmission Lines

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και ο υπολογισμός της κεραυνικής συμπεριφοράς καθώς και η σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Προτείνονται δύο νέες μεθοδολογίες για τον ακριβή υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων σε εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Η πρώτη μεθοδολογία επεκτείνει και βελτιώνει τις υπάρχουσες αναλυτικές τεχνικές και μεθόδους, ενώ η δεύτερη προσεγγίζει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Οι δύο μεθοδολογίες αναπτύσσονται κυρίως για γραμμές αντίστοιχες με αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, όπου διέρχονται ταυτόχρονα από ανομοιογενή γεωγραφικά περιοχές και περιοχές με διαφορετικά μετεωρολογικά στοιχεία. Τέλος προτείνεται μία νέα μεθοδολογία σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης με στόχο την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας διδακτορικής διατριβής όχι μόνο για την ανάθεσή της, αλλά και για την συνεχή και αμέριστη συμπαράστασή του και ηθική υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της προσπάθειάς μου. Ελπίζω να εκπλήρωσα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις προσδοκίες του.

Αισθάνομαι την ανάγκη επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον φίλο και συνεργάτη κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια και χρόνο που μου διέθεσε, όπως επίσης και για την καθοδήγησή του, υποστήριξή του και συμπαράστασή του καθ' όλη την παραμονή μου στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Διάρθρωση της διατριβής	3
1.3	Συμβολή - Πρωτοτυπία	4

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία και Χαρακτηριστικά Κεραυνών και Γραμμών Μεταφοράς Υψηλής Τάσης

2.1	Εισαγ	ωγή	5
2.2	Κεραι	ονικά στοιχεία και χαρακτηριστικά	6
	2.2.1	Γενικά περί κεραυνού	6
	2.2.2	Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη	7
	2.2.3	Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων	8
	2.2.4	Κατηγορίες ατμοσφαιρικών εκκενώσεων	10
	2.2.5	Παράμετροι κεραυνού	10
	2.2.6	Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό	12
2.3	Μετεα	ορολογικά στοιχεία και χαρακτηριστικά	12
	2.3.1	Κεραυνική στάθμη - Ισοκεραυνικές καμπύλες	12
	2.3.2	Πυκνότητα κεραυνών - Κεραυνοπληξία γραμμών	14
2.4	Στοιχε	ία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης	16
	2.4.1	Χαρακτηριστικά ελληνικών γραμμών μεταφοράς	16
	2.4.2	Εξωτερικές καταπονήσεις γραμμών μεταφοράς	19
	2.4.3	Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης - Ανάστροφη διάσπαση	20
	2.4.4	Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο	21
2.5	Συμπε	ράσματα	22

Υπολογισμός Κεραυνικών Σφαλμάτων με χρήση Αναλυτικών Μεθόδων

3.1	Εισαγ	ωγή	25
3.2	Βιβλιο	ογραφική ανασκόπηση	26
3.3	Σχετικ	ςή θεωρία	30
	3.3.1	Προσομοίωση Monte-Carlo	30
		3.3.1.1 Η έννοια της προσομοίωσης	31
		3.3.1.2 Παραγωγή τυχαίων αριθμών	31
	3.3.2	Αντίσταση γείωσης πύργων	33
	3.3.3	Κεραυνικές παράμετροι	37
3.4	Ανάπ	τυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας	38
	3.4.1	Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης	40
	3.4.2	Ανάστροφη διάσπαση	42
	3.4.3	Συνολικά κεραυνικά σφάλματα	43
3.5	Ανάπ	τυξη υπολογιστικού πακέτου (λογισμικού)	44
3.6	Συμπε	εράσματα	47
3.7	Βιβλιο	ογραφία	49

Κεφάλαιο 4

Υπολογισμός Κεραυνικών Σφαλμάτων με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

4.1	Εισαγ	νωγή	53
4.2	Βιβλι	ογραφική ανασκόπηση	54
4.3	Θεωρ	ία τεχνητών νευρωνικών δικτύων	57
	4.3.1	Τεχνητοί νευρώνες	57
		4.3.1.1 Δομή νευρώνων	57
		4.3.1.2 Συναρτήσεις ενεργοποίησης	58
	4.3.2	Αρχιτεκτονικές δικτύων	60

		4.3.2.1 Μονοστρωματικά νευρωνικά δίκτυα	60
		4.3.2.2 Πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα	61
		4.3.2.3 Ανατροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα	61
	4.3.3	Διαδικασία μάθησης	62
		4.3.3.1 Μάθηση «σφάλμα-διόρθωση» (error-correction)	62
		4.3.3.2 Μάθηση με επίβλεψη	63
		4.3.3.3 Μάθηση χωρίς επίβλεψη	64
	4.3.4	Δίκτυο perceptron	64
		4.3.4.1 Το κριτήριο perceptron	65
		4.3.4.2 Αλγόριθμος μάθησης perceptron	66
		4.3.4.3 Γραμμική διαχωριστικότητα	66
	4.3.5	Αλγόριθμος μάθησης backpropagation (ανάστροφης διάδοσης	
		σφάλματος)	68
		4.3.5.1 Γενίκευση	71
		4.3.5.2 Αλγόριθμος μάθησης backpropagation και δομή δικτύων	72
		4.3.5.3 Αλγόριθμος Levenberg-Marquardt	75
	4.3.6	Δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function	
		networks)	76
		4.3.6.1 Εκπαίδευση δικτύων RBF	77
	4.3.7	Σύγκριση MLP και RBF	79
4.4	Ανάπ	τυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας	80
4.5	Συμπε	εράσματα	83
4.6	Βιβλια	ογραφία	84

Μέθοδος Σχεδίασης Γραμμών Μεταφοράς Υψηλής Τάσης για Ελαχιστοποίηση των Κεραυνικών Σφαλμάτων

5.1	Εισαγ	ωγή	88
5.2	Βιβλι	ογραφική Ανασκόπηση	89
5.3	Θεωρία βελτιστοποίησης συναρτήσεων		90
	5.3.1	Ελαχιστοποίηση χωρίς περιορισμούς	91
		5.3.1.1 Ελαχιστοποίηση συναρτήσεων μιας μεταβλητής	91

		5.3.1.2 Ελαχιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών	94
5.4	Ανάπτ	τυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας	97
	5.4.1	Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης	98
	5.4.2	Αντικειμενική συνάρτηση	99
	5.4.3	Υποθέσεις	100
	5.4.4	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης	101
5.5	Συμπε	ράσματα	102
5.6	Βιβλια	ργραφία	104

Εφαρμογή των Προτεινόμενων Μεθοδολογιών σε Ελληνικές Γραμμές Μεταφοράς Υψηλής Τάσης

6.1	Εισαγωγή	106
6.2	Ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης	107
6.3	Εφαρμογή μεθοδολογίας υπολογισμού κεραυνικών σφαλμάτων με	
	χρήση αναλυτικών μεθόδων	113
6.4	Εφαρμογή μεθοδολογίας υπολογισμού κεραυνικών σφαλμάτων με	
	χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων	126
6.5	Εφαρμογή μεθοδολογίας σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης	
	για ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων	139
6.6	Σύγκριση προτεινόμενων μεθοδολογιών με πραγματικά καταγεγραμμένα	
	στοιχεία και με μεθοδολογία από τη διεθνή βιβλιογραφία	145
6.7	Συμπεράσματα	156
6.8	Βιβλιογραφία	158

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1	Συμπεράσματα	159
7.2	Συμβολή - Πρωτοτυπία	161
7.3	Επέκταση της διατριβής	164

ΠαράρτημαΑ

165

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η κεραυνοπληξία των 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.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έρχεται να συμβάλει στην προσπάθεια που συντελέστηκε τα τελευταία πενήντα χρόνια, προτείνοντας νέες μεθοδολογίες τόσο για τον ακριβέστερο υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, όσο και για τον καλύτερο σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων.

1

Πιο συγκεκριμένα ακολουθώντας τα βήματα άλλων ερευνητών αναπτύσσεται μία νέα αναλυτική-πιθανοτική μεθοδολογία που υπολογίζει τα σφάλματα γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης τόσο λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας, όσο και λόγω του φαινομένου της ανάστροφης διάσπασης. Η μεθοδολογία αυτή βελτιώνει και επεκτείνει προηγούμενες μελέτες, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια, διαχωρίζοντας για πρώτη φορά τις γραμμές μεταφοράς σε περιοχές και διεξάγοντας την ανάλυση για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτών. Η τεχνική αυτή κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη για γραμμές ανάλογες με αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, όπου οι γραμμές διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές. Με βάση τη μεθοδολογία αυτή δημιουργήθηκε ένα εύχρηστο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (λογισμικό) έτοιμο προς χρήση από εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια προτείνεται μία νέα μεθοδολογία για τον υπολογισμό και πάλι της κεραυνικής συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η μεθοδολογία αυτή, τελείως ανεξάρτητη από τις μέχρι σήμερα διεθνής ερευνητικές προσπάθειες, χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό υπολογιστική νοημοσύνη και πιο συγκεκριμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Έτσι η μεθοδολογία αυτή απαγκιστρώνεται από εμπειρικές και προσεγγιστικές εξισώσεις και παραδοχές και βασίζεται μόνο σε πραγματικά στοιχεία και παραμέτρους των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, που αναμφίβολα κατέχουν μείζονα ρόλο στην ύπαρξη των κεραυνικών σφαλμάτων.

Τέλος παρατίθεται μια νέα μεθοδολογία σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που προτείνει εκείνες τις βέλτιστες τιμές των κατασκευαστικών παραμέτρων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των γραμμών ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κεραυνικά σφάλματα.

<u>1.2 Διάρθρωση της διατριβής</u>

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διαρθρώνεται ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διάρθρωση, η συμβολή και η πρωτοτυπία της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο κεφάλαιο δύο παρουσιάζονται στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών και γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Περιγράφεται συνοπτικά το φαινόμενο του κεραυνού, δίνονται στοιχεία σχετικά με τις παραμέτρους του, τα αποτελέσματά του και τους παράγοντες που τον επηρεάζουν. Στη συνέχεια παραθέτονται μετεωρολογικοί ορισμοί, μελέτες και στοιχεία που αφορούν την πλήξη γραμμών μεταφοράς από κεραυνούς. Τέλος δίνονται κατασκευαστικά στοιχεία σχετικά με τις ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, την προστασία αυτών από κεραυνούς και των τρόπων δημιουργίας σφαλμάτων σε αυτές.

Στο κεφάλαιο τρία, αφού παρουσιαστούν οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και αφού δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία, καθώς επίσης και το υπολογιστικό πακέτο (λογισμικό) που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη των πολύπλοκων υπολογισμών.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει την ιστορική αναδρομή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων από τη δημιουργία τους έως σήμερα. Παραθέτει την θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και αναλύει τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αφού αναφερθούν εν συντομία οι πιο σημαντικές μελέτες για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς και περιγραφεί η θεωρία βελτιστοποίησης συναρτήσεων, παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδίασης για την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εφαρμογή των προτεινόμενων τριών μεθοδολογιών σε ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Επιλέγονται δεκαπέντε χαρακτηριστικές γραμμές των 150 kV και 400 kV και υπολογίζεται τόσο η κεραυνική τους συμπεριφορά σύμφωνα με τις προτεινόμενες μεθοδολογίες των κεφαλαίων τρία και τέσσερα, όσο και προτείνονται εκείνες οι βέλτιστες τιμές των κατασκευαστικών παραμέτρων που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των γραμμών, για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνό. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με αυτά άλλης από τη

3

διεθνή βιβλιογραφία μεθοδολογίας καθώς και με πραγματικές καταγεγραμμένες τιμές κεραυνικών σφαλμάτων.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και αναδεικνύεται η συμβολή της παρούσης διδακτορικής διατριβής στην έρευνα του υπολογισμού της κεραυνικής συμπεριφοράς και της σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

<u>1.3 Συμβολή - Πρωτοτυπία</u>

Η συμβολή-πρωτοτυπία του διδακτορικού μπορεί πολύ συνοπτικά να συνοψισθεί στα ακόλουθα:

- Πρόταση νέας αναλυτικής-πιθανοτικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.
- Ανάπτυξη υπολογιστικού πακέτου (λογισμικού) για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.
- Πρόταση νέας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.
- Πρόταση νέας μεθοδολογίας για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων.
- Ανάλυση των γραμμών μεταφοράς σε περιοχές λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία των περιοχών.
- Λεπτομερή ανάλυση της επίδρασης της μηνιαίας μεταβολής της αντίστασης γείωσης πύργων και κεραυνικής στάθμης στη κεραυνική συμπεριφορά.

Στοιχεία και Χαρακτηριστικά Κεραυνών και Γραμμών Μεταφοράς Υψηλής Τάσης

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται γενικά στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών και γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Πιο συγκεκριμένα δίνεται μία συνοπτική περιγραφή του μηχανισμού δημιουργίας κεραυνών, του διαχωρισμού τους σε κατηγορίες, των γεωγραφικών στοιχείων και κλιματολογικών φαινομένων που μπορούν να τους επηρεάσουν, καθώς επίσης παρουσιάζονται βασικοί μετεωρολογικοί ορισμοί και συνθήκες σχετικά με την κεραυνοπληξία των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Τέλος δίνονται σύντομες περιγραφές των κατασκευαστικών στοιχείων και χαρακτηριστικών ελληνικών γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, των εξωτερικών καταπονήσεων λόγω κεραυνοπληξίας που δέχεται η μόνωση μιας γραμμής, των φαινομένων της ανάστροφης διάσπασης και της απευθείας κεραυνοπληξίας αγωγού φάσης και του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου.

2.2 Κεραυνικά στοιχεία και χαρακτηριστικά

2.2.1 Γενικά περί κεραυνού

Ο κεραυνός μπορεί να οριστεί ως μια παροδική, υψηλή τρέχουσα ηλεκτρική εκκένωση η πορεία της οποίας μετριέται γενικά σε χιλιόμετρα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα. Ο κεραυνός δημιουργείται κυρίως σε νέφη καταιγίδας, αν και κεραυνοί έχουν εμφανιστεί και σε χιονοθύελλες και νέφη επάνω από ηφαίστεια που εκρήγνυνται. Κεραυνοί έχουν παρατηρηθεί ακόμη και σε καθαρό ουρανό.

Απαραίτητες προϋποθέσεις για τη δημιουργία μιας καταιγίδας είναι τα ανοδικά ρεύματα και η υγρασία. Μόνο όταν συνυπάρξουν οι δύο αυτοί παράγοντες σε κατάλληλη «ποσότητα» και αναλογία έχουμε καταιγίδα με επακόλουθα ισχυρές ηλεκτρικές εκκενώσεις.

Τα ανοδικά ρεύματα είναι η πρώτη προϋπόθεση. Τέτοια ρεύματα δημιουργούνται κατά διαφόρους τρόπους. Το καλοκαίρι, π.χ., η επιφάνεια του εδάφους που θερμαίνεται μεταδίδει ένα μέρος της θερμότητάς της στο κατώτερο στρώμα του αέρα. Ο αέρας αυτός διαστέλλεται, γίνεται ελαφρότερος και ανεβαίνει στα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας δημιουργώντας τα ανοδικά ρεύματα. Άλλος τρόπος δημιουργίας ανοδικών ρευμάτων είναι η εισβολή ψυχρού ανέμου μέσα σε όγκο ζεστού αέρα ο οποίος εξαναγκάζεται σε άνοδο.

Η δεύτερη προϋπόθεση είναι η υγρασία. Υγρασία δημιουργείται με συνεχή εξάτμιση νερού που ευρίσκεται στην επιφάνεια της γης. Ο ζεστός αέρας που ανέρχεται με ανοδικό ρεύμα στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας ψύχεται και έτσι αυξάνει η σχετική υγρασία. Από την επίδραση δε άλλων παραγόντων, όπως θερμοκρασία και ταχύτητα ανέμου, εξαρτάται ο σχηματισμός νέφους καταιγίδας, δημιουργία βροχής ή χαλαζιού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 τα νέφη καταιγίδας κατατάσσονται με βάση το μέγεθος από μικρά νέφη, τα οποία εμφανίζονται στις ημιτροπικές περιοχές στις οποίες η

θερμοκρασία μπορεί να είναι παντού άνω του σημείου ψύξεως, έως μεγάλες ηλεκτρικές καταιγίδες, οι οποίες μπορούν κάθετα να εκτείνονται σε ύψος που υπερβαίνει τα 20 km. Το ύψος ενός τυπικού νέφους καταιγίδας είναι 8 km με 12 km, αν και τυπικές τιμές μπορούν να δοθούν μόνο για δεδομένη γεωγραφική θέση.



Σχήμα 2.1: Κατάταξη νεφών καταιγίδας που προκαλούν κεραυνικές εκκενώσεις.

2.2.2 Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη

Έως σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία αναφορικά με το μηχανισμό ηλέκτρισης ενός νέφους καταιγίδας. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές θεωρίες: εκείνη που βασίζεται στην φόρτιση σταγονιδίων του νέφους, που συμβαίνει μόλις αρχίσει η πτώση τους προς τη γη και σε εκείνη που βασίζεται στη μεταφορά φορτίων σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με ανοδικά ρεύματα που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές.

Τρία φαινόμενα τα οποία μπορεί να υποτεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων είναι το φαινόμενο της διασποράς, το φαινόμενο της ισχυρής ψύξεως και το φαινόμενο της διαρρήξεως. Σύμφωνα με τα φαινόμενα αυτά και συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού νέφους μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις [1]:

α) Ένα ηλεκτρισμένο νέφος περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο πρόσημων σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Δηλαδή η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα νέφη παρουσιάζουν κατά κανόνα στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Cb και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Έτσι στο χώρο μεταξύ νέφους και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του νέφους.

β) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των πρόσημων δημιουργούν μια συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο νέφος, που διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα σ' ένα ηλεκτρισμένο νέφος.

γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο νέφος συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (από μερικά πρώτα λεπτά της ώρας έως μισή ώρα περίπου).

2.2.3 Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων



Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (σχήμα 2.2):

Σχήμα 2.2: Τα είδη των κεραυνών και η κατανομή του φορτίου στα νέφη κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.

α) Μεταξύ νέφους και γης ή και αντίστροφα: Οι κεραυνοί αυτοί παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον της γης, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του νέφους, που την προκάλεσε.



Οι κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης είναι η πιο καταστροφική και παράλληλα επικίνδυνη μορφή κεραυνού. Αν και δεν είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος, είναι αυτός ο οποίος κατανοείται καλύτερα. Οι περισσότεροι κεραυνοί εκδηλώνονται κοντά στην αρνητική περιοχή του νέφους. Όμως, μια σημαντική μειονότητα από κεραυνούς μεταφέρει θετικό φορτίο στην γη. Αυτοί οι θετικοί κεραυνοί συχνά συμβαίνουν κατά την διάρκεια της καταιγίδας. Οι θετικοί κεραυνοί είναι επίσης περισσότερο γνωστοί σαν ποσοστό προσκρούσεων στο έδαφος κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών.

β) Εντός του ίδιου του νέφους: Οι κεραυνοί μέσα στα νέφη είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εκφορτίσεως. Στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές από μερικές εκατοντάδες έως 1000 Amperes. Η διαδικασία συμβαίνει μέσα στο νέφος και έξω από το νέφος φαίνεται σαν διαχέουσα λαμπρότητα που τρεμοσβήνει.



γ) Μεταξύ των νεφών: Κεραυνοί αυτού του τύπου εκδηλώνονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Οι κεραυνοί αυτοί έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, έως και 40 km.

2.2.4 Κατηγορίες ατμοσφαιρικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μπορούν να διακριθούν ανάλογα της πολικότητάς τους σε:

α) Θετικές εκκενώσεις, που αποτελούνται από μία μόνο εκκένωση διάρκειας από 0,1 έως 0,2 s. Η διάρκεια μετώπου αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 μs και 50 μs, το δε εύρος του ρεύματος εκκενώσεως που αντιπροσωπεύουν μπορεί να υπερβεί τα 100 kA, ενώ η μέση κλίση μετώπου είναι 2 kA/μs.

β) Αρνητικές εκκενώσεις, που αποτελούνται συνήθως από τρεις ή και περισσότερες διαδοχικές εκφορτίσεις. Η διάρκεια όλου του φαινομένου, κυμαίνεται μεταξύ 0,2 s και 1 s. Η διάρκεια μετώπου και το εύρος της πρώτης εκκένωσης είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για θετικές εκκενώσεις (διάρκεια μετώπου 10 μs έως 15 μs). Για τις μετά την πρώτη εκφορτίσεις το μεν εύρος είναι λίγο μικρότερο από αυτό της πρώτης, η δε διάρκεια μετώπου είναι σημαντικά μικρότερη κυμαινόμενη μεταξύ 0,5 s και 1 μs. Η κλίση μετώπου για την πρώτη εκκένωση υπερβαίνει τα 20 kA/μs, ενώ για τις επόμενες είναι πολύ μεγαλύτερη (τάξεως 40 kA/μs) [1].

Στον ελλαδικό χώρο όπου το κλίμα είναι εύκρατο, το 80% έως 90% των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων είναι αρνητικές.

2.2.5 Παράμετροι κεραυνού

Σπουδαίες μελέτες, όπως αυτές των Κ. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger [2] από την Ελβετία και του Ε. Katz [3] από το Ισραήλ, δημοσιεύθηκαν σχετικά με κεραυνικές παραμέτρους, οι οποίες και βασίσθηκαν σε μετρήσεις κεραυνικών εκκενώσεων που πραγματοποιήθηκαν σε μετεωρολογικούς σταθμούς των χωρών τους. Στις μελέτες αυτές παρουσιάζονται παράμετροι σχετικοί με κεραυνικά ρεύματα

και τυπικές μορφές κεραυνικών ρευμάτων, ενώ γίνεται αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων εκείνων που συντελούν σε μία καλή προσέγγιση του αριθμού των κεραυνικών εκκενώσεων που πλήττουν μία οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται και η μελέτη των R.B. Anderson, A.J. Eriksson [4], αφού παραθέτουν στοιχεία από παρατηρήσεις και άλλων ερευνητών, όπως των B.F.J. Schonland [5] από την Νότια Αφρική, R.D. Brantley [6] από τη Φλόριντα, F. Popolansky [7] από τη Τσεχοσλοβακία και Ε.Τ. Pierce [8] από το Ηνωμένο Βασίλειο, δίνοντας τη δυνατότητα σύγκρισης των πραγματοποιούμενων μετρήσεων και προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τις κεραυνικές εκκενώσεις.

Γενικότερα η κεραυνική εκκένωση ως ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες τέσσερις παραμέτρους:

- α) τη μέγιστη τιμή ρεύματος,
- b) th mégisth klish metώpou tou reúmatos $\left(\frac{di}{dt}\right)_{met}$,

 γ) το μεταφερόμενο φορτίο $\int i(t) dt$ και

δ) το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int i^2(t) dt$, ποσότητα ανάλογη της εκλυόμενης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας.

Η κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές έχει από ενοχλητικές έως καταστροφικές συνέπειες για τις ανθρώπινες ζωές και τις τεχνικές εγκαταστάσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι συνέπεια της μέγιστης τιμής, είναι η υπερπήδηση μονωτήρων και η καταστροφή των μονωτικών υλικών, εξαιτίας της ανύψωσης του δυναμικού του πληγέντος σημείου.

Επίσης δραματικές συνέπειες μπορεί να επιφέρει και η μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος αφού καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόγχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών. Το μεταφερόμενο φορτίο του κεραυνού συνήθως

προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους. Τέλος θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων) μπορεί να προκαλέσει το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος που είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας.

2.2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό

Σε μια περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές η ένταση του ρεύματος του κεραυνού όπως και το σχετικό φορτίο είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση γης - νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φορτίσεως του νέφους και στο ότι το μικρό σχετικά μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν επακόλουθο τη συσσώρευση ενός μικρού μόνο φορτίου κατά μήκος αυτού.

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνο στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές, όπου η απόσταση νέφους - γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σπάνια, σχετικά, το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους - γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχετών εκκενώσεως μεγάλου μήκους.

Επίσης σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων παίζει και η εποχή. Το καλοκαίρι λόγω σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μία απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους.

2.3 Μετεωρολογικά στοιχεία και χαρακτηριστικά 2.3.1 Κεραυνική στάθμη - Ισοκεραυνικές καμπύλες

Κεραυνική στάθμη συγκεκριμένου τόπου είναι το πλήθος των ημερών καταιγίδας που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο τόπο σε ένα έτος.

Μέρα καταιγίδας χαρακτηρίζεται εκείνη κατά τη διάρκεια της οποίας ακούγεται μία τουλάχιστον βροντή.

Στον πίνακα 2.1 παρατίθεται ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών καταιγίδας δώδεκα χαρακτηριστικών ελληνικών νομών. Τα στοιχεία αυτά έχουν διατεθεί και καταγραφεί από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που έχει εγκαταστήσει η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία στους κατά τόπους νομούς [9].

					Μέσος Ετήσιος
Σταθμός	Γεωγραφικό	Γεωγραφικό	Υψόμετρο	Περίοδος	Αριθμός Ημερών
	Πλάτος	Μήκος	(m)		Καταιγίδας
Λαμίας	38° 51' N	22° 24' E	17.4	1999-2004	22.2
Κοζάνης	40° 17' N	21° 50' E	626.2	1999-2004	27.6
Θεσ/νίκης	40° 31' N	22° 58' E	4.8	1999-2004	31.2
Σερρών	41° 05' N	23° 34' E	34.5	1999-2004	27.2
Άρτας	39° 10' N	21° 00' E	10.5	1999-2004	43.0
Πρέβεζας	38° 58' N	20° 46' E	4.0	1999-2004	43.2
Κέρκυρας	39° 37' N	19° 55' E	4.0	1999-2004	44.0
Ιωαννίνων	39° 42' N	20° 49' E	484.0	1999-2004	41.6
Πύργου	37° 40' N	21° 18' E	12.0	1999-2004	30.8
Πάτρας	38° 15' N	21° 44' E	1.0	1999-2004	21.6
Αγρινίου	38° 37' N	21° 23' E	25.0	1999-2004	44.4
Καρπενησίου	38° 54' N	21° 47' E	930.0	1999-2004	11.4

Πίνακας 2.1: Στατιστικά στοιχεία από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Ισοκεραυνική καμπύλη ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη. Γεωγραφικά στον ελλαδικό χώρο οι ισοκεραυνικές περιοχές, που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3, κατανέμονται με τα μέχρι σήμερα στοιχεία ως κατωτέρω:

- Μέχρι 25: Ανατολική Πελοπόννησος, Ανατολική Στερεά, Εύβοια, Ανατολική Κρήτη.
- Μέχρι 35: Κεντρική Πελοπόννησος, Κεντρική Μακεδονία, Ανατολική Μακεδονία, Θράκη, Βόρειοι Σποράδες, Κυκλάδες.

- Μέχρι 45: Δυτική Μακεδονία, Κρήτη, Ανατολικά Νησιά Αιγαίου, Νότια Πελοπόννησος.
- Μέχρι 55: Νησιά Ιονίου, Ήπειρος, Δυτική και Κεντρική Στερεά, Δυτική Πελοπόννησος.



Σχήμα 2.3: Ισοκεραυνικές καμπύλες στον ελλαδικό χώρο.

2.3.2 Πυκνότητα κεραυνών - Κεραυνοπληξία γραμμών

Από την κεραυνική στάθμη υπολογίζεται η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km² που πέφτουν στο έδαφος σε ένα συγκεκριμένο τόπο και ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν μια γραμμή μεταφοράς.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας των κεραυνών υπήρξαν κατά την δεκαετία του 1980 πολλές μελέτες και μετρήσεις με σημαντικότερη αυτή του A.J. Eriksson [10] που πρότεινε την εξίσωση (2.1), βασιζόμενος σε μετρήσεις και παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη Νότια Αφρική για διάστημα μεγαλύτερο των έξι ετών συσχετίζοντας τα καταγεγραμμένα δεδομένα από τετρακόσιους επίγειους μετρητές κεραυνικών εκκενώσεων και εξήντα μετεωρολογικούς σταθμούς.

$$N_g = 0,04 \ T^{1,25} \tag{2.1}$$

όπου:

 N_g είναι η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km^2 και Tείναι οι ημέρες καταιγίδας.

Ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν μια γραμμή μεταφοράς, μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές που πρότειναν αρκετές εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του με σημαντικότερες μελέτες αυτές των J.G. Anderson [11], F.A.M. Rizk [12] και A.J. Eriksson [10].

Έτσι ο J.G. Anderson εφαρμόζοντας ένα μοντέλο εξαρτώμενο από το ύψος των αγωγών προστασίας, και δεχόμενος ότι η γραμμή μεταφοράς δημιουργεί ένα είδος «ηλεκτρικής σκιάς» στο έδαφος και ότι ο οποιοσδήποτε κεραυνός που πέφτει μέσα στη ζώνη της σκιάς προσβάλλει την γραμμή, πρότεινε την ακόλουθη σχέση:

$$N_L = 0,004 \ T^{1,35} \cdot (g + 4H^{1,09}) \tag{2.2}$$

όπου:

 N_L είναι ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν μία γραμμή μεταφοράς για κάθε 100 km σε ένα έτος,

Τ είναι το επίπεδο κεραυνοπληξίας στην περιοχή των γραμμών μεταφοράς (ημέρες καταιγίδας ανά έτος),

g είναι η οριζόντια απόσταση σε m ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας και Η είναι το μέσο ύψος σε m των αγωγών προστασίας.

Ο F.A.M. Rizk πρότεινε την σχέση (2.3), σύμφωνα με μια ανάλυση παλινδρόμησης που πραγματοποίησε στο γενικευμένο μοντέλό έναρξης θετικής εκκένωσης.

$$N_L = 0,004 \ T^{1,25} \cdot (g + 38H^{0,45}) \tag{2.3}$$

Ο A.J. Eriksson πρότεινε την σχέση (2.4) για τον υπολογισμό του αριθμού των κεραυνών που πλήττουν μια γραμμή.

$$N_L = 0,004 \ T^{1,25} \cdot (g + 28h_t^{0,6}) \tag{2.4}$$

όπου:

 h_t είναι το ύψος του πύργου σε m.

Το μοντέλο του A.J. Eriksson εξαρτάται μόνο από το ύψος του πύργου (h_t) , ενώ τα άλλα προκύπτουν από το μέσο ύψος των αγωγών προστασίας (H), που είναι συνάρτηση τόσο του ύψους του πύργου όσο και του βέλους του τόξου. Να σημειωθεί ότι το μέσο ύψος των πύργων είναι περίπου 10% με 20% μεγαλύτερο από το ύψος των αγωγών προστασίας.

2.4 Στοιχεία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης 2.4.1 Χαρακτηριστικά ελληνικών γραμμών μεταφοράς

Τα γενικά χαρακτηριστικά των ελληνικών γραμμών μεταφοράς ζητήθηκαν και διατέθηκαν από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ Α.Ε.) [13]. Συνοπτικά αναφέρεται ότι οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, που χρησιμοποιούνται σήμερα στον ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο είναι κατά κύριο λόγο εναέριες και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την τάση που μεταφέρουν. Στις γραμμές μεταφοράς των 150 kV και στις γραμμές μεταφοράς των 400 kV. Τόσο οι γραμμές των 150 kV, όσο και οι γραμμές των 400 kV, διαχωρίζονται σε γραμμές ελαφρύ και βαρύ τύπου, όπως επίσης και σε μονού ή διπλού κυκλώματος.

Οι εναέριες γραμμές αναρτώνται από μονωτήρες που με τη σειρά τους αναρτώνται από πύργους. Οι πύργοι ή πυλώνες είναι συνήθως χαλύβδινα στατικά δικτυώματα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου (κοιλία) του αναρτημένου αγωγού και για χαλύβδινους πύργους με γραμμές υψηλής τάσεως, το άνοιγμα, η απόσταση των πύργων οριζοντίως κυμαίνεται μεταξύ 330 m και 400 m.

Υπάρχουν δύο κύρια είδη πύργου:

 α) Οι πύργοι ευθύγραμμου πορείας στους οποίους πρέπει να υποστηριχθεί μόνο η δύναμη που προέρχεται από το βάρος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

β) Οι πύργοι αλλαγής πορείας που ονομάζονται πύργοι αποκλίσεως ή πύργοι γωνίας, επειδή υποστηρίζουν επιπλέον και τη δύναμη που χρειάζεται για να αλλάξει η κατεύθυνση της γραμμής.

Οι πύργοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας είναι κυρίως τριών τύπων και παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.





Σχήμα 2.4: Οι πύργοι των ελληνικών γραμμών μεταφοράς 400 kV και 150 kV

Στις γραμμές μεταφοράς των 150 kV το μέσο ύψος των αγωγών φάσης είναι περί τα 22 m (ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους μπορούν να αναρτηθούν έως και στα 25 m), ενώ στις γραμμές μεταφοράς των 400 kV το μέσο ύψος των αγωγών φάσης είναι περί τα 28 m (ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους μπορούν να αναρτηθούν έως και τα 47 m). Επίσης η μέση οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς φάσης για τις γραμμές μεταφοράς των 150 kV με μονό κύκλωμα είναι τα 7 m, ενώ με διπλό κύκλωμα τα 8,5 m. Αντίθετα η μέση οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς φάσης για τις γραμμές μεταφοράς των 400 kV με μονό κύκλωμα είναι τα 8,5 m, ενώ με διπλό κύκλωμα τα 8,5 m. Αντίθετα η μέση οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς φάσης για τις γραμμές μεταφοράς των 400 kV με μονό κύκλωμα είναι τα 8,5 m, ενώ με διπλό κύκλωμα φτάνουν έως και τα 13 m. Ανάλογα, πάντα, με τον τύπο του πύργου στον οποίο αναρτώνται οι γραμμές μεταφοράς, χρησιμοποιούνται ένας ή δύο αγωγοί προστασίας (γειωμένοι αγωγοί), έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν (προστατευθούν) οι αγωγοί φάσης από απευθείας πτώση κεραυνού και να ανακουφισθούν από μέρος της επαγομένης τάσης από έμμεσους κεραυνούς (κεραυνός που κτυπά τη γη κοντά σε μία γραμμή).

Η ΔΕΗ Α.Ε. σχεδιάζει τις γραμμές μεταφοράς των 150 kV να έχουν μέγιστη τάση αντοχής ίση με 750 kV, ενώ η μέγιστη τάση αντοχής που προβλέπεται για τις γραμμές μεταφοράς των 400 kV είναι τα 1425 kV και 1550 kV.

Τέλος στην ελληνική επικράτεια χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ Α.Ε. δύο διαφορετικά πλέγματα συστημάτων γείωσης πύργων, όπως δίνονται στο σχήμα 2.5. Η χρήση των πλεγμάτων αυτών εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους, με το πλέγμα Ι να χρησιμοποιείται όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει χαμηλές τιμές και το πλέγμα ΙΙ να χρησιμοποιείται όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει υψηλές τιμές.

Για όλους τους πύργους του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, το πλέγμα Ι έχει συνολικό μήκος 200 m και το πλέγμα ΙΙ 240 m. Η πλευρά όμως του τετραγώνου, και συνεπώς το μήκος και των υπόλοιπων ηλεκτροδίων μεταβάλλονται και είναι διαφορετικά σε κάθε πύργο, εφόσον εξαρτώνται από τις διαστάσεις του εκάστοτε πύργου.

18



Σγήμα 2.5: Τα συστήματα γείωσης για τους πύργους των ελληνικών γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

2.4.2 Εξωτερικές καταπονήσεις γραμμών μεταφοράς

Σε μία γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης κάθε ατμοσφαιρική εκκένωση με τιμή ρεύματος πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο προσβάλλει τους αγωγούς προστασίας. Κεραυνοί μικρότερης έντασης προσβάλλουν τις φάσεις, πλην όμως η προκύπτουσα υπέρταση δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει σφάλμα στην γραμμή. Επομένως, πρέπει να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού του αγωγού προστασίας ώστε να καθορισθούν οι αποστάσεις μεταξύ αγωγών προστασίας και φάσεων και ακόμη να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού των γειτονικών πύργων, ώστε να καθοριστεί η μόνωση αυτών και των φάσεων [1].

Επειδή η ανύψωση του δυναμικού του πύργου μπορεί να διατηρηθεί σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, αν είναι μικρή η αντίσταση γείωσης του πύργου, έχει κανείς δύο εναλλακτικές λύσεις κατά την σχεδίαση μίας γραμμής μεταφοράς: είτε καλές γειώσεις και σχετικά χαμηλή μόνωση στη γραμμή, είτε μέτριες γειώσεις αλλά σχετικά υψηλή μόνωση στη γραμμή.

Βασικές παράμετροι της σχεδίασης μιας γραμμής μεταφοράς, όσον αφορά τη μόνωση της, είναι το διάκενο αέρα ανάμεσα στις φάσεις και τους πύργους, το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, το διάκενο αέρα μεταξύ φάσεων και αγωγών προστασίας

και τέλος το διάκενο αέρα μεταξύ διαφορετικών φάσεων. Ανάλογα με το εκάστοτε ελεγχόμενο είδος διηλεκτρικής καταπόνησης για κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους προκύπτει μία ελάχιστη τιμή. Η σωστή σχεδίαση της μόνωσης μίας γραμμής μεταφοράς απαιτεί όπως για κάθε μία παράμετρο ληφθεί η μέγιστη από τις ελάχιστες τιμές που προκύψανε για την ίδια παράμετρο, όταν εξετάζονταν χωριστά τα διάφορα είδη καταπονήσεων [1].

2.4.3 Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης - Ανάστροφη διάσπαση

Οι δύο τρόποι που ο κεραυνός προκαλεί ενδεχομένως βλάβη ή διαταραχή σε μία γραμμή μεταφοράς είναι η απευθείας κεραυνοπληξία του αγωγού φάσης (shielding failure) και η ανάστροφη διάσπαση (backflashover).

Για την περίπτωση της απευθείας κεραυνοπληξίας του αγωγού φάσης αναπτύχθηκε μία ηλεκτρογεωμετρική θεωρία της οποίας η κύρια παραδοχή είναι η ακόλουθη: Η ποσότητα του φορτίου που είναι συγκεντρωμένη στην κεφαλή της κατερχόμενης βηματικής προεκκένωσης (stepped leader) ανυψώνει το δυναμικό της κεφαλής σε μια υψηλή τιμή η οποία εξαρτάται αφ' ενός από το ρεύμα του κεραυνού που θα ακολουθήσει και αφ' ετέρου από την απόσταση της κεφαλής από διάφορα αντικείμενα επί του εδάφους από τα οποία θα ξεκινήσουν ανερχόμενες προεκκενώσεις για να σχηματισθεί τελικά η πλήρης γεφύρωση μεταξύ νέφους και γης.

Το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης δημιουργείται κατά τις εξής δύο διαδικασίες:

α) με την απ' ευθείας προσβολή ενός πύργου ή ενός αγωγού προστασίας της γραμμής
από κεραυνό και την ανύψωση του δυναμικού του πύργου λόγω του διαρρέοντος σε
αυτόν ρεύματος του κεραυνού,

β) με την προσβολή ενός κύριου αγωγού φάσης της γραμμής, την εν συνέχεια διάσπαση της μόνωσης της προσβεβλημένης φάσης με αποτέλεσμα την ανύψωση του δυναμικού του πύργου (λόγω του δημιουργούμενου ρεύματος από την διάσπαση

20

προς γη), και τέλος την (λόγω της ανύψωσης δυναμικού) ανάστροφη διάσπαση μεταξύ πύργου και μιας μέχρι τότε υγιούς φάσης.

Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες, που δεν είναι σαφώς γνωστοί σχετιζόμενοι με το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Όπως:

- η συμπεριφορά της μεταλλικής κατασκευής του πύργου όταν αυτός διαρρέεται από το κρουστικό ρεύμα,
- η κατανομή του ρεύματος προς τον πύργο και τον προσβληθέντα αγωγό γης και
- η τάση διάσπασης μεταξύ μίας φάσης που βρίσκεται σε βιομηχανική συχνότητα και του πύργου με το ανυψωμένο, λόγω του ρεύματος του κεραυνού δυναμικό κ.λ.π.

2.4.4 Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο

Μία πρώτη εκδοχή του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου αναπτύχθηκε από τους F.S. Young, J.M. Clayton, A.R. Hileman [14] στην προσπάθειά τους να αναλύσουν την αποτελεσματικότητα των αγωγών προστασίας που χρησιμοποιούνταν στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, ενώ η μελέτη τους συνεχίστηκε, βελτιώθηκε και τροποποιήθηκε από πολλούς άλλους ερευνητές [11, 12, 15-19].

Το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο θεωρείται ότι αποδίδει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που εκδηλώνονται κατά την κεραυνοπληξία μιας γραμμής μεταφοράς [1]. Βασική παραδοχή είναι ότι το δυναμικό της κεφαλής του κατερχόμενου οδηγού οχετού εξαρτάται από το ρεύμα I του κεραυνού και από την απόσταση r_c από γειωμένα αντικείμενα, από τα οποία θα ξεκινήσουν ανερχόμενες προεκκενώσεις, που, συναντώντας τον κατερχόμενο οδηγό οχετό, συμβάλλουν στη γεφύρωση του διακένου νέφους - γης. Ο οδηγός οχετός θα πλήξει εκείνο το γειωμένο αντικείμενο που πρώτο θα βρεθεί σε απόσταση r_c από την κεφαλή του. Τα δύο μεγέθη I (σε kA) και r_c (σε m) συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$r_c = A \cdot I^b \tag{2.5}$$

όπου:

A και b είναι σταθερές εξαρτώμενες από το σημείο κατάληξης του οχετού.

Αν και υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές εκδοχές του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου όπου η κάθε μία από αυτές χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές για τις σταθερές *A* και *b* (πίνακας 2.2), όλες λαμβάνουν υπόψη τους τις ακόλουθες τρεις παραδοχές:

α) οι οχετοί προσπίπτουν κάθετα,

β) ο οδηγός οχετός αναπτύσσεται ανεπηρέαστος από την παρουσία γειωμένων αντικειμένων εωσότου φτάσει σε απόσταση r_c ανάμεσα στην κεφαλή του και στο γειωμένο αντικείμενο και

γ) η απόσταση r_c σχετίζεται με το ρεύμα I του κεραυνού.

Απόσταση d από:				
Πηγή	Гη		Αγωγό φό αγωγό προ	ίσης και οστασίας
	Α	b	Α	b
Amstrong [15]	6,0	0,80	6,7	0,80
Brown [16]	6,4	0,75	7,1	0,75
Love [17]	10,0	0,65	10,0	0,65
Rizk [12]	μη διαθ.	μη διαθ.	1,57 h ^{0.45}	0,69
IEEE WG [19]	5,12 ή 6,4 ή 8,0	0,65	8,0	0,65

<u>Πίνακας 2.2</u>: Οι σταθερές A και b για την απόσταση r_c της σχέσης: $r_c = A \cdot I^b$.

2.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν γενικά κεραυνικά και μετεωρολογικά στοιχεία και χαρακτηριστικά, όπως επίσης και σύντομες περιγραφές κατασκευαστικών στοιχείων και χαρακτηριστικών των ελληνικών γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Τα στοιχεία αυτά κρίνονται ως ένα απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τη θεμελίωση της διδακτορικής αυτής διατριβής.

2.6 Βιβλιογραφία

- [1] Ι.Α. Σταθόπουλος, "Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
- [2] K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger, "Parameters of lightning flashes", Electra, no. 41, pp. 23-37, 1975.
- [3] E. Katz, "The lightning detection system in Israel", MedPower04, Cyprus, 2004.
- [4] R.B. Anderson, A.J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications", Electra, no. 69, pp. 65-102, 1980.
- [5] B.F.J. Schonland, "The lightning discharge", Handbuch der Physik, vol. 22, pp.576-628, Springer-Verlag OHG, Berlin, 1956.
- [6] R.D. Brantley, J.A. Tiller, M.A. Uman, "Lightning properties in Florida thunderstorms from video tape records", Journal Geophysics Research, vol. 80, no. 24, pp. 3402-3406, 1975.
- [7] F. Popolansky, "Frequency distribution of amplitudes of lightning currents", Electra, no. 22, pp. 139-147, 1970.
- [8] E.T. Pierce, "Electrostatic field changes due to lightning", Qtrly Jour. Roy. Met. Soc., vol. 81, no. 348, pp. 211-228, 1955.
- [9] Στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Αθήνα, 2004.
- [10] A.J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to transmission lines", IEEE Trans on PWRD, vol. 2, pp. 859-870, 1987.
- [11] J.G. Anderson, "Transmission line reference book, 345 kV and above", Chapter 12, 2nd Edition, Electric Power Research Institute, pp. 545-597, Palo Alto, CA, 1982.
- [12] F.A.M. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes", IEEE Trans on PWRD, vol. 5, no. 4, pp. 1983-1997, 1990.
- [13] ΔΕΗ Α.Ε., "Ετήσια έκθεση δραστηριότητας γραμμών μεταφοράς", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, 2004.
- [14] F. S. Young, J. M. Clayton, A.R. Hileman, "Shielding of transmission lines", IEEE Trans, vol. 82, pp. 132-154, 1963.
- [15] H.R. Armstrong, E.R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission line shielding", IEEE Trans. on PAS, vol. 87, pp. 270-281, 1968.

- [16] G.W. Brown, E.R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission line shielding-II", IEEE Trans on PAS, vol. 88, pp. 617-626, 1969.
- [17] R.R. Love, "Improvements on lightning stroke modeling and applications of the design of the EHV and UHV lines", M.Sc. Thesis, University of Colorado, 1973.
- [18] R.H. Golde, "Discussion of field and analytical studies of transmission line shielding: part II", IEEE Trans on PAS, vol. 88, no. 5, 1969.
- [19] 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, pp. 919-927, 1985.

Υπολογισμός Κεραυνικών Σφαλμάτων με χρήση Αναλυτικών Μεθόδων

3.1 Εισαγωγή

Η σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης για μια προκαθορισμένη κεραυνική συμπεριφορά απαιτεί μια μέθοδο υπολογισμού των κεραυνικών σφαλμάτων της γραμμής. Τα τελευταία πενήντα χρόνια έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές σε ολόκληρο τον κόσμο πολλές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων και την καλύτερη προστασία των γραμμών από τους κεραυνούς χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές τεχνικές.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανασκόπηση που έγινε στην παγκόσμια βιβλιογραφία, σχετικά με τη συμπεριφορά και προστασία των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης έναντι κεραυνοπληξίας, δίνοντας μία ολοκληρωμένη εικόνα της έως σήμερα έρευνας στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια αφού δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, αναπτύσσεται μία νέα μεθοδολογία για την ακριβέστερη εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπόψη της τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης.
Τέλος παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό πρόγραμμα (πακέτο λογισμικού) που αναπτύχθηκε, βασιζόμενο στην προτεινόμενη μεθοδολογία, έτοιμο προς χρήση από εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας για τη σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Μία κεραυνική εκκένωση μπορεί να προκαλέσει μία πρόσκαιρη υπέρταση σε μια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης, είτε πλήττοντας απευθείας τους αγωγούς φάσης, είτε πλήττοντας τον πύργο ή τους αγωγούς προστασίας (φαινόμενο ανάστροφης διάσπασης). Στην προσπάθεια να διατηρηθεί 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.

Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται σε αναλογικά υπολογιστικά συστήματα (analogue computer systems), σε τεχνικές Monte-Carlo (Monte-Carlo techniques) και γεωμετρικά μοντέλα (geometrical models), σε μεθόδους βασισμένες σε θεωρίες πεδίων (field theory methods) και οδευόντων κυμάτων (travelling waves) και τέλος σε υπολογιστικά εργαλεία προσομοιώσεων.

Επεκτείνοντας τη μέθοδο που πρότεινε το AIEE Committee [1], οι J.M. Clayton, F.S. Young [2] ήταν από τους πρώτους ερευνητές, οι οποίοι κατάφεραν να εκτιμήσουν την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιώντας αναλογικά υπολογιστικά συστήματα βασισμένα σε γενικευμένες υπολογιστικές καμπύλες, οι οποίες και σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη πραγματικές τιμές επιπέδων μόνωσης, αντιστάσεων γείωσης πύργων και αποστάσεων μεταξύ πύργων. Και οι δύο μελέτες παραθέτουν παραδείγματα, μελετώντας τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν την κεραυνική συμπεριφορά, ενώ περιγράφεται η ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή των υπολογιστικών καμπυλών που είναι ο καθορισμός του συνδυασμού (αναλογίας) της αντίστασης γείωσης και αριθμού μονωτήρων έτσι ώστε να επιτευχθεί η εκάστοτε επιθυμητή κεραυνική συμπεριφορά. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ η μέθοδος του [1] αποδείχθηκε χρήσιμη στον σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς έως 230 kV, απέτυχε στην ακριβή εκτίμηση συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλότερης τάσης σε αντίθεση με την μέθοδο του [2] όπου αποδείχθηκε αξιόπιστη για γραμμές από 115 kV έως 700 kV.

Πρώτος ο J.G. Anderson το 1961 [3] και στη συνέχεια οι M.A. Sargent, M. Darveniza [4], οι M. Darveniza, F. Popolansky, E.R. Whitehead [5], οι C. Bouquegneau, M. Dubois, J. Trekat [6], καθώς και πολλοί άλλοι προσπάθησαν να επιλύσουν το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo. Οι τεχνικές Monte-Carlo απέκτησαν το όνομά τους από την τυχαία επιλογή καθορισμένων συνόλων παραμέτρων συγκροτώντας ένα πείραμα - δοκιμή, και την χρησιμοποιήση του ιδίου συνόλου παραμέτρων σε ένα αναλυτικό μοντέλο, ώστε να υπολογιστεί το αποτέλεσμα του πειράματος - δοκιμής. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται τόσο στην απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης, όσο και στο φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Στη μέθοδο αυτή οι κεραυνικές παράμετροι παρουσιάζονται ως πιθανοτικές κατανομές σε ένα πρόγραμμα που παράγει τυχαίους αριθμούς και επιλέγει υποθετικά κεραυνικά πλήγματα. Η επεξεργασία μεγάλου συνόλου εξισώσεων, σχετικά με τη διαδικασία υπερτάσεων κεραυνόπληκτων γραμμών μεταφοράς, απαιτεί τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών υπολογιστών με μεγάλη μνήμη και προγραμματιστική προσαρμοστικότητα.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μελέτη των F.A. Fisher, J.G. Anderson, J.H. Hagenguth [7], όπου μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γεωμετρικά μοντέλα πύργων γραμμών μεταφοράς 345 kV της ηλεκτρικής εταιρίας του Οχάιο, έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με θεωρητικούς υπολογισμούς. Στη μελέτη αυτή διατυπώνεται επίσης μία απλοποιημένη θεωρία, χρησιμοποιώντας στοιχεία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και γραμμών μεταφοράς, η οποία εξηγεί τη σχέση ανάμεσα στις τάσεις στα άκρα των μονωτήρων, τις κεραυνικές τάσεις και τα κεραυνικά ρεύματα.

Η συμπεριφορά κεραυνόπληκτων γραμμών μεταφοράς μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές με βάση αναλυτικές θεωρητικές μεθοδολογίες. Μία από τις πρώτες μελέτες ήταν αυτή των R. Lundholm, R.B. Finn, W.S. Price [8], όπου χρησιμοποιήθηκαν θεωρητικοί υπολογισμοί βασισμένοι στην θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τις εξισώσεις του Maxwell.

27

Τα επαγωγικά φαινόμενα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων του κεραυνικού οχετού και των μαγνητικών πεδίων των ρευμάτων της σύνθετης κυματικής αντίστασης του πύργου, χρησιμοποιήθηκαν από τους P. Chowdhuri, S. Li, P. Yan [9] για την ανάλυση των σφαλμάτων ανάστροφης διάσπασης, ενώ τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χρησιμοποιεί και το μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης για τον υπολογισμό σφαλμάτων απευθείας κεραυνοπληξίας που προτάθηκε από τους J.He, Y. Tu, R. Zeng, L.B. Lee, S.H. Chang, Z. Guan [10]. Μία άλλη προσέγγιση διατυπωμένη από τους J.H. Hagenguth, J.G. Anderson [11] βασίσθηκε στη συγκριτική μέθοδο, κατά την οποία η υπό μελέτη γραμμή συγκρίνεται με μία γραμμή πρότυπο, για την οποία τόσο η έκθεσή της σε κεραυνικές εκκενώσεις, όσο και τα σφάλματα αυτής είναι πλήρως και με μεγάλη ακρίβεια γνωστά.

Ο C.R. Torres [12] χρησιμοποίησε πιθανοτικές και αναλυτικές μεθόδους για να εκτιμήσει τα σφάλματα απευθείας κεραυνοπληξίας και ανάστροφης διάσπασης, ενώ μία άλλη σημαντική αναλυτική θεωρητική μέθοδος είναι και αυτή των οδεύοντων κυμάτων που παρουσιάστηκε στις μελέτες του L.V. Bewley [13] και των G.D. Breuer, A.J. Schultz, R.H. Schlomann, W.S. Price [14]. Η μέθοδος των οδεύοντων κυμάτων αντιμετωπίζει τον πύργο ως μία μικρή γραμμή μεταφοράς, η οποία έχει καθορισμένη σύνθετη κυματική αντίσταση και μπορεί να θεωρηθεί είτε σταθερή είτε μεταβλητή, ανάλογα με το βαθμό ακρίβειας που απαιτείται. Κατά τη μέθοδο αυτή, τα μεταβαλλόμενα κύματα τάσης και ρεύματος μεταφέρονται μέσω αυτής της σύνθετης αντίστασης του πύργου και των αγωγών προστασίας και καταλήγουν στην κορυφή του πύργου δημιουργώντας μία τάση που επιβάλλεται στους μονωτήρες του πύργου.

Βέβαια στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μεθοδολογίες και τεχνικές εκτίμησης της κεραυνικής συμπεριφοράς που προαναφέρθηκαν χρησιμοποίησαν στους υπολογισμού τους μοντέλα γειώσεων και πύργων που αναπτύχθηκαν είτε με βάση πειραματικές διατάξεις, είτε με προσομοιώσεις. Τα σημαντικότερα από αυτά μοντέλα περιγράφονται στις μελέτες των ΙΕΕΕ Working Group [1, 15, 16], F.A.M Rizk [17], M.E. Almeida, M.T. Correia de Barros [18], T. Yamada, A. Mochizuki, J. Sawada, E. Zaima [19] και A.P.S. Meliopoulos, R. Cooper [20].

Η τεχνολογική πρόοδος που σημειώθηκε τις τελευταίες δεκαετίες, ιδίως στο χώρο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προγραμμάτων

(πακέτων λογισμικού) ικανών να προσομοιώσουν συστήματα και προβλήματα τέτοια, που λόγω του όγκου τους και της πολυπλοκότητάς τους, ήταν πρακτικά αδύνατο και ασύμφορο να μελετηθούν πειραματικά. Έτσι αφού προηγήθηκαν μελέτες όπως αυτές των Μ. Ishii και άλλων [21], Τ. Yamada και άλλων [22], Β. Vahidi, S.E. Naghibi [23], S.J. Shelemy, D.R. Swatek [24] όπου πύργοι, κεραυνικές εκκενώσεις και υπερτάσεις μοντελοποιούνται και χρησιμοποιούνται σε προγράμματα προσομοίωσης, ακολούθησαν πολλοί άλλοι ερευνητές οι οποίοι αναπαράστησαν γραφικά τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης και το όλο φαινόμενο, και μελέτησαν και εκτίμησαν με ακρίβεια την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών. Τα προγράμματα προσομοίωσης που χρησιμοποίησαν ήταν κυρίως τα ΕΜΤΡ [25, 26], ΑΤΡ [27] και PSpice [28].

Η κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης απασχόλησε τα τελευταία πενήντα χρόνια δεκάδες ερευνητές, που όλοι ακολουθώντας τις προαναφερθείσες τεχνικές ή και συνδυασμό αυτών προσπάθησαν να μελετήσουν τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης και να υπολογίσουν με ακρίβεια τα σφάλματα που προκαλούνται εξαιτίας αυτών. Σημαντικές μελέτες που πρέπει να αναφερθούν, οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στην εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς και δεν μπορούν να ταξινομηθούν αποκλειστικά σε μία από τις προαναφερθείσες τεχνικές είναι αυτές του ΙΕΕΕ Working Group [15, 16], του G.W. Brown [29, 30], του J.T. Whitehead [31], των A.C. Liew, P.C. Thum [32], του T. Udo [33], και τέλος των A.P.S. Meliopoulos, W. Adams, R. Casey [34].

Σύμφωνα με τις μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, οι οποίες όλες προσπάθησαν να υπολογίσουν με ακρίβεια την κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, αναπτύχθηκαν και παρουσιάσθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία, πολλά προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή (πακέτα λογισμικού), έτσι ώστε γρήγορα και αξιόπιστα να επιλυθεί ο μεγάλος αριθμός των πολύπλοκων εξισώσεων που περιλαμβάνονται σε αυτές.

To IEEE Working Group [15, 16] πρώτο ανέπτυξε το πρόγραμμα FLASH που υπολογίζει με σχετική ακρίβεια τα σφάλματα γραμμών μεταφοράς λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας και ανάστροφης διάσπασης, το οποίο βελτιώθηκε και

τροποποιήθηκε αρκετά από άλλους ερευνητές μιας και ο κώδικάς του διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο. Οι Α.Μ. Mousa, K.D. Srivastana [35] ανάπτυξαν ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή για την ανάλυση των επιπτώσεων των κεραυνικών πληγμάτων σε γραμμές μεταφοράς. Το πρόγραμμα λόγω της μεγάλης υπολογιστικής του δύναμης λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραμέτρους εκείνες που σχετίζονται με την κεραυνοπληξία των γραμμών χωρίς να προβαίνει στις απλοποιήσεις που ακολουθούν άλλες μεθοδολογίες. Οι Μ. Abedi, B. Vahidi, M.B. Chatri [36] υλοποίησαν ένα πρόγραμμα βασισμένο στη μεθοδολογία που ανέπτυξε ο J.G. Anderson [37] και υπολόγισαν τα σφάλματα απευθείας κεραυνοπληξίας και ανάστροφης διάσπασης για γραμμές των 400 kV του Ιρανικού ηλεκτρικού συστήματος. Τέλος οι Η. Torres και άλλοι [38] από το Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Λισσαβόνας ανέπτυξαν το πρόγραμμα DESCARGA για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς εγκαταστημένες σε τροπικές ζώνες και το σύγκριναν τόσο με το πρόγραμμα FLASH, όσο και με πραγματικά καταγεγραμμένα στοιχεία αποδεικνύοντας την ακρίβεια που αυτό παρέχει αλλά και τη λειτουργικότητά του.

3.3 Σχετική θεωρία

3.3.1 Προσομοίωση Monte-Carlo

Όπως είναι γνωστό η λύση, το αποτέλεσμα ενός προβλήματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δύο κυρίως βασικές μεθοδολογίες. Τις άμεσες αναλυτικές τεχνικές και την στοχαστική προσομοίωση. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθοδολογίες έγκειται στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται το αποτέλεσμα [39].

Οι αναλυτικές τεχνικές αναπαρασταίνουν το πρόβλημα με ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο συχνά απλοποιείται, και το αποτέλεσμα υπολογίζεται με καθαρά μαθηματικές λύσεις.

Αντίθετα οι τεχνικές προσομοίωσης υπολογίζουν το αποτέλεσμα προσομοιώνοντας την πραγματική κατάσταση και τυχαία «συμπεριφορά» του προβλήματος. Δηλαδή η μέθοδος της προσομοίωσης αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως μία σειρά πραγματικών πειραμάτων που διεξάγονται σε προκαθορισμένο χρόνο. Προτού περιγραφεί η τεχνική της προσομοίωσης, θα ήταν σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά της:

- Η τεχνική της προσομοίωσης είναι συνήθως εκτεταμένη, αν και οι σύγχρονοι υπολογιστές κάνουν το πρόβλημα αυτό μη υπολογίσιμο.
- Τα αποτελέσματα της τεχνικής εξαρτώνται άμεσα από τη μηχανή παραγωγής τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται και το πλήθος των προσομοιώσεων.
- Η τεχνική της προσομοίωσης μπορεί να ενσωματώσει και να επεξεργαστεί οποιαδήποτε χαρακτηριστικά του προβλήματος, χωρίς να προβεί σε μη ρεαλιστικές απλοποιήσεις.
- Η τεχνική αυτή παρέχει ένα μεγάλο εύρος αποτελεσμάτων.

3.3.1.1 Η έννοια της προσομοίωσης

Τα υποδείγματα «συμπεριφορών» *n* ίδιων πραγματικών προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο, θα είναι όλα διαφορετικά ως προς όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν το υπό εξέταση πρόβλημα. Έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση της προσομοίωσης κεραυνικών πληγμάτων οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται: στη μέγιστη τιμή του ρεύματος, στη μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος, στο χρόνο ανάμεσα σε δύο κεραυνικά πλήγματα κτλ. Αυτό οφείλεται στην «τυχαία» φύση της διαδικασίας που χρησιμοποιείται. Επομένως η πιθανή «συμπεριφορά» κάποιου προβλήματος μπορεί να ακολουθεί οποιοδήποτε από τα παραπάνω υποδείγματα.

Η διαδικασία της προσομοίωσης εξετάζει και προβλέπει αυτά τα πραγματικά υποδείγματα «συμπεριφοράς» μέσα σε χρόνο προσομοίωσης, με σκοπό να αποκτήσει κατανομές συχνοτήτων - πιθανοτήτων βασικών παραμέτρων του προβλήματος και να υπολογίσει στη συνέχεια με εκτίμηση την αναμενόμενη ή μέση τιμή της κάθε παραμέτρου. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τυχαίους αριθμούς και μετατρέποντας τους σε γνωστές συναρτήσεις πυκνότητας.

3.3.1.2 Παραγωγή τυχαίων αριθμών

Οι τυχαίοι αριθμοί είναι απαραίτητοι σε όλες τις τεχνικές προσομοίωσης. Ένας (ομοιόμορφος) τυχαίος αριθμός είναι μία μεταβλητή που έχει τιμές ομοιόμορφα

κατανεμημένες στο διάστημα (0, 1), δηλαδή η μεταβλητή μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή ανάμεσα στο μηδέν και τη μονάδα με ίσες πιθανότητες. Οι τυχαίοι αριθμοί δημιουργούνται από ένα ψηφιακό ηλεκτρονικό υπολογιστή που χρησιμοποιεί αλγορίθμους και καλείται μηχανή παραγωγής τυχαίων αριθμών. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω του ότι οι παραγόμενοι αριθμοί ακολουθούν τους μαθηματικούς κανόνες του αλγόριθμου, δεν είναι πραγματικά τυχαίοι αριθμοί γι' αυτό και καλούνται και ψευδό-τυχαίοι αριθμοί [39].

Οι βασικές απαιτήσεις της μηχανής παραγωγής είναι οι τυχαίοι αριθμοί να κατέχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- τυχαία και ομοιόμορφη κατανομή,
- μεγάλη χρονική περίοδο προτού επαναληφθεί η ακολουθία,
- αναπαραγωγικότητα έτσι ώστε η ίδια ακολουθία να μπορεί να επαναληφθεί και
- υπολογιστική ακρίβεια στην παραγωγή τους.

Οι πιο δημοφιλής αλγόριθμοι για παραγωγή τυχαίων αριθμών είναι αυτοί στους οποίους ένας καινούργιος αριθμός X_{i+1} σε μία ακολουθία υπολογίζεται από την προηγούμενη τιμή X_i χρησιμοποιώντας την έκφραση:

$$X_{i+1} = (AX_i + C) \pmod{B} \tag{3.1}$$

όπου: A (ο πολλαπλασιαστής), B (το modulus - το υπόλοιπο μετά την διαίρεση) και C (ο βαθμός αύξησης) είναι όλοι μη αρνητικοί ακέραιοι.

Η διαδικασία αρχίζει επιλέγοντας μία τιμή για το X_0 και η ακολουθία παράγεται αυτόματα επαναλαμβάνοντας τον εαυτό της για έναν αριθμό βημάτων, ο οποίος μπορεί να δειχθεί ότι είναι ίσος με μία τιμή όχι μεγαλύτερη από το *B*. Γενικά μία μηχανή παραγωγής τυχαίων αριθμών υπάρχει ως μέρος του λογισμικού (software) των περισσότερων ψηφιακών ηλεκτρονικών υπολογιστών και των γλωσσών προγραμματισμού [39]. Η παράσταση του modulo - του υπολοίπου μετά την διαίρεση (mod B) της εξίσωσης (3.1), σημαίνει ότι:

$$X_{i+1} = A X_i + C - Bk_i$$
(3.2)

όπου: $k_i = (AX_i + C) / B$ δεικνύει το μεγαλύτερο θετικό ακέραιο στο $(AX_i + C) / B$.

Αφού παραχθεί η ακολουθία των τυχαίων αριθμών X_i , ένας ομοιόμορφος αριθμός U_i μέσα στο διάστημα (0, 1) μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$U_i = \frac{X_i}{B} \tag{3.3}$$

Στην προσομοίωση Monte-Carlo δεν αρκεί να παραχθούν τυχαίοι αριθμοί που να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι και να αντιστοιχούν σε μία συγκεκριμένη κατανομή. Είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της αντίστροφης συνάρτησης από τη συνάρτηση πιθανοτικής κατανομής. Στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή οι τυχαίοι αριθμοί ακολουθούν την λογαριθμική κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ.

3.3.2 Αντίσταση γείωσης πύργων

Η κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης είναι στενά συνδεδεμένη με την ειδική αντίσταση του εδάφους. Ειδικά σε περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς που διέρχονται από περιοχές με διαφορετική σύσταση του εδάφους, η ύπαρξη ακόμα και ενός μικρού αριθμού πύργων σε έδαφος με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης μπορεί να αλλοιώσει τη γενική κεραυνική συμπεριφορά της γραμμής και να δημιουργήσει μια εντελώς λανθασμένη εντύπωση για ολόκληρη τη γραμμή. Ειδικά για γραμμές που διέρχονται από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι εντελώς διαφορετική όχι μόνο από περιοχή σε περιοχή, αλλά παρουσιάζει διαφορετικές τιμές για την ίδια περιοχή κατά τη διάρκεια του έτους. Η πιο ακριβής μέθοδος για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης μονοστρωματικού εδάφους είναι η μέθοδος Wenner [40]. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα σε μία ευθεία γραμμή και ισαπέχοντα το ένα από το άλλο απόσταση *α*. Τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια εμφυτεύονται με το κάτω μέρος τους μερικώς στο έδαφος, ενώ το άνω άκρο τους συνδέεται σε ένα μετρητικό όργανο, το γειωσόμετρο. Το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων και μετριέται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους *ρ*, με την προϋπόθεση ότι η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων είναι πολύ μεγαλύτερη από το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R \tag{3.4}$$

όπου:

R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου) και α είναι η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων,

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τριών παραμέτρων (της ειδικής αντίστασης ρ_1 του επάνω στρώματος του εδάφους, της ειδικής αντίστασης ρ_2 του κάτω στρώματος του εδάφους και του βάθους του πάνω στρώματος h, ενώ θεωρείται ότι το κάτω στρώμα έχει άπειρο βάθος). Για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g :

$$F_g = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| \rho_{\alpha i}^m - \rho_{\alpha i}^c \right|}{\rho_{\alpha i}^m}$$
(3.5)

όπου:

ρ^m_{αi} είναι η i^{ιοστή} μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με α, και

 $\rho_{\alpha i}^{c}$ είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με α που αντιστοιχεί στο $i^{io\sigma t \delta}$ ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.6-3.8) [40-42]:

$$\rho_{\alpha}^{c} = \rho_{1} \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} k^{n} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{A+3}} \right) \right)$$
(3.6)

k είναι ο συντελεστής ανάκλασης και δίνεται από την εξίσωση:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{3.7}$$

και

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h}{\alpha}\right)^2 \tag{3.8}$$

Αν και υπάρχουν στη βιβλιογραφία αρκετές τεχνικές για την ανάλυση της δομής του εδάφους και τον υπολογισμό των παραμέτρων της ειδικής αντίστασης του εδάφους $(\rho_1, \rho_2 \text{ και } h)$ [41], στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό αυτό μία μέθοδος γενετικού αλγορίθμου και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [42]. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η μηνιαία μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση *α*=10m ανάμεσα στα ηλεκτρόδια όπως επίσης και η ειδική αντίσταση του εδάφους ως προς την απόσταση *α* για τρεις διαφορετικούς μήνες του χρόνου [43].

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή που υπολογίστηκε των παραμέτρων $(\rho_1, \rho_2 \text{ και } h)$ της ειδικής αντίστασης ενός διστρωματικού εδάφους [43]. Γίνεται φανερό ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες τιμές κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, αφού υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές βροχοπτώσεις ξηραίνουν στην καλύτερη περίπτωση, μόνο το επάνω στρώμα του εδάφους.



Σχήμα 3.1: Μηνιαία μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση
 α=10m ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και ειδική αντίσταση του εδάφους
 ως προς α για τρεις διαφορετικούς μήνες του χρόνου.

Η μηνιαία μεταβολή της αντίστασης γείωσης πύργου μπορεί εύκολα να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλεγμάτων γείωσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, version 11.0.54) της εταιρίας SES και τις προαναφερθείσες υπολογισμένες παραμέτρους της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Όσο αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλεγμάτων γείωσης, στη διδακτορική αυτή διατριβή χρησιμοποιούνται τα δύο πλέγματα συστημάτων γείωσης πύργων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.4.1 (σχήμα 2.4). Η υπολογισμένη αντίσταση γείωσης πύργου (με τη χρήση του CDEGS) και για τα δύο πλέγματα της αντίστασης γείωσης πύργων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2, όπου γίνεται φανερό ότι η αντίσταση γείωσης πύργου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 3.2: Η μεταβολή των παραμέτρων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης πύργου.

Τα σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μηνιαίες μεταβολές της ειδικής αντίστασης του εδάφους για διαφορετικές περιοχές της Αθήνας. Οι μετρήσεις αυτές, όπως και πολλές άλλες που πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων [43], χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό είτε με την καταγεγραμμένη κατά την κατασκευή αντίσταση γείωσης πύργου, είτε της ειδικής αντίστασης του εδάφους και το μήνα που πραγματοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις, ως ένα εργαλείο για να εκτιμηθεί η τιμή της αντίστασης γείωσης πύργου για κάθε ένα μήνα του χρόνου.

3.3.3 Κεραυνικές παράμετροι

Στη διδακτορική αυτή διατριβή χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς δύο κεραυνικές παράμετροι, η κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος (di/dt) και η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος (I_{peak}). Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμέτρους αυτές βασίστηκαν στις μετρήσεις των K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger [44] που πραγματοποιήθηκαν στο Monte San Salvatore της Ελβετίας

(πίνακας 3.1), ενώ στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τιμές που αφορούν μετρήσεις άλλων ερευνητικών ομάδων [45, 46]. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα όλων των ερευνητικών ομάδων, το 90% των κεραυνικών εκκενώσεων θεωρούνται αρνητικές, ενώ το 10% των κεραυνικών εκκενώσεων θεωρούνται θετικές.

Berger και άλλοι [44]		μ (μέση τιμή)	σ (διασπορά)
Θετικός κεραυνός	I _{max} (kA)	35	1,21
Θετικός κεραυνός	di/dt (kA/µs)	2,4	1,54
Αρνητικός κεραυνός	I _{max} (kA)	30	0,53
Αρνητικός κεραυνός	di/dt (kA/µs)	12	0,54
CIGRE WG [45]			
Αρνητικός κεραυνός	I _{max} (kA)	31,1	0,48
Αρνητικός κεραυνός	di/dt (kA/µs)	24,3	0,60
Garbagnati και άλλοι [46]			
Αρνητικός κεραυνός	I _{max} (kA)	33	0,25
Αρνητικός κεραυνός	di/dt (kA/µs)	14	0,36

<u>Πίνακας 3.1:</u>	Κεραυνικές	παράμετροι	λογαριθμικής	κανονικής	κατανομής	για
	θετικούς και	αρνητικούς κ				

Έτσι για να προσομοιωθούν οι κεραυνικές εκκενώσεις, και για να χρησιμοποιηθούν οι κεραυνικές παράμετροι $(di/dt, I_{peak})$ στους υπολογισμούς της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αυτές επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από τις παραπάνω πιθανοτικές κατανομές, χρησιμοποιώντας την τεχνική προσομοίωσης Monte-Carlo που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.1, με την παραδοχή ότι τόσο η μέγιστη τιμή όσο και η κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος ακολουθούν την λογαριθμική κανονική κατανομή και δεν υπάρχει αλληλοσυσχέτιση μεταξύ τους.

3.4 Ανάπτυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποσκοπεί στην ακριβέστερη εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη της τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης, όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης υπολογίζοντας τα σφάλματα που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις δυο περιπτώσεις [48-53].

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας, η οποία συνδυάζει τεχνικές τόσο από τη διεθνή βιβλιογραφία όσο και νέες που αναπτύχθηκαν από το συγγραφέα, είναι ότι οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε περιοχές, εξαιτίας των διαφορετικών μετεωρολογικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που επικρατούν κατά μήκος της γραμμής. Έτσι η ανάλυση της κεραυνικής συμπεριφοράς δεν πραγματοποιείται μία φορά για όλο το μήκος της γραμμής, αλλά ξεχωριστά για κάθε μία περιοχή, εκτιμώντας τα κεραυνικά σφάλματα που συμβαίνουν σε κάθε μία από αυτές.

Επιπλέον ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στις μηνιαίες μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε γεωγραφικής περιοχής και της μηνιαίας αντίστασης γείωσης πύργων της κάθε περιοχής της υπό ανάλυση γραμμής. Η μηνιαία αντίσταση γείωσης πύργων που μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.2, χρησιμοποιώντας είτε την καταγεγραμμένη κατά την κατασκευή αντίσταση γείωσης πύργων, είτε τις παραμέτρους της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων γείωσης. Έτσι σε αντίθεση με άλλες μεθοδολογίες η προτεινόμενη μεθοδολογία δε χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς ετήσιες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων και μετεωρολογικών συνθηκών, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων, ιδιαίτερα για γραμμές τέτοιες, όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που συμβαίνει να διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές όπου κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως η κεραυνική στάθμη και η αντίσταση γείωσης πύργων είναι σημαντικά διαφορετικά κατά μήκος της γραμμής.

Οι ακόλουθοι παράγραφοι (3.4.1-3.4.3), παρουσιάζουν τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν με σκοπό την εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης τόσο λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας όσο και λόγω του φαινομένου της ανάστροφης διάσπασης.

39

3.4.1 Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης

Τα σφάλματα λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} υπολογίζονται σύμφωνα με την τεχνική που βασίζεται στο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο και παρουσιάστηκε στο [16]. Τα N_{SF} σχετίζονται με το ελάχιστο ρεύμα I_{min} , το οποίο απαιτείται για να προκληθεί διάσπαση της μόνωσης, και υπολογίζονται από την (3.9):

$$N_{SF} = \frac{2 \cdot N_g \cdot l}{10} \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} D_C \cdot f(I) \ dI$$
(3.9)

όπου:

 N_g είναι η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km² και δίνεται από τη σχέση (2.1) της παραγράφου 2.3.1,

l είναι το μήκος της γραμμής σε km,

f(I) είναι η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας του ρεύματος ίση με:

$$f(I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2,6}}$$

Ι είναι το κεραυνικό ρεύμα σε kA,

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

 I_{min} είναι το ελάχιστο ρεύμα ίσο με: $2U_a / Z_{surge}$ [16],

 U_a είναι το επίπεδο μόνωσης της γραμμής μεταφοράς σε kV,

 Z_{surge} είναι η κυματική σύνθετη αντίσταση του αγωγού σε Ω, ίση με [15]:

$$60 \cdot \sqrt{\ln \frac{4 h_C}{d} \cdot \ln \frac{4 h_C}{D}}$$
, όπου:

 h_C είναι το ύψος του αγωγού φάσης σε m,

d είναι η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού φάσης χωρίς το φαινόμενο corona,
 D είναι η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού φάσης με το φαινόμενο corona και
 D_c είναι η απόσταση έκθεσης των αγωγών λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας (σχήμα
 3.3) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D_c = r_c \left[\cos \theta - \cos \left(\alpha + \beta \right) \right]$$

όπου: α είναι η γωνία προστασίας που φαίνεται στο σχήμα 3.3,

 r_c δίνεται από την εξίσωση (2.5) της παραγράφου 2.4.4 και:

$$\theta = \sin^{-1} \left[(r_g - h_c) / r_c \right],$$

$$\beta = \sin^{-1} \left[(\alpha^2 + (h_{sw} - h_c)^2)^{0.5} / 2r_c \right] (\operatorname{dym} 3.3),$$

όπου:

 r_g ισούται με 0,552 r_c για γραμμές μεταφοράς των 400 kV και με 0,915 r_c για γραμμές μεταφοράς των 150 kV και

 h_{sw} είναι το ύψος των αγωγών προστασίας.



Σγήμα 3.3: Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο: αναπαράσταση αγωγών φάσης και προστασίας.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σχέση (3.9) υπολογίζει τον αριθμό των σφαλμάτων λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας για μία γραμμή μεταφοράς ανά έτος χρησιμοποιώντας στους υπολογισμούς ετήσιες τιμές μετεωρολογικών συνθηκών. Η προτεινόμενη ωστόσο μεθοδολογία χρησιμοποιεί μηνιαίες τιμές αποσκοπώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι η σχέση (3.9) τροποποιείται ως προς την πυκνότητα των κεραυνών N_g , με το να αντικαθίσταται από τη μηνιαία πυκνότητα των κεραυνών N_{gm} που δίνεται από τη σχέση:

$$N_{gm} = 0,04 \cdot 1,860 \cdot T_m^{1,25} \tag{3.10}$$

όπου:

 T_m είναι το μηνιαίο επίπεδο κεραυνοπληξίας στην περιοχή των γραμμών μεταφοράς (ημέρες καταιγίδας ανά μήνα).

3.4.2 Ανάστροφη διάσπαση

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τον συγγραφέα στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζεται σε αυτή την παράγραφο, τα σφάλματα λόγω ανάστροφης διάσπασης N_{BF} υπολογίζονται για μια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης από την εξίσωση [48-53]:

$$N_{BF} = N_L \cdot \int_0^\infty P(\delta) \ d\delta \tag{3.11}$$

όπου:

N_L είναι ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν τη γραμμή και δίνεται από τη σχέση (2.2) της παραγράφου 2.3.1,

 $P(\delta)$ είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων της τυχαίας μεταβλητής δ , η οποία αποτελεί συνάρτηση των δύο τυχαίων μεταβλητών I_{peak} και di/dt όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\delta(I_{peak}, di/dt) = R \cdot I_{peak}/2 - \alpha \cdot U_a + L \cdot di/dt$$
(3.12)

με δ
 μεγαλύτερο του μηδενός, όταν υπάρχει ανάστροφη διάσπαση,

Rείναι η αντίσταση γείωσης πύργου σε Ω ,

L είναι η συνολική ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος (αυτεπαγωγή πύργου και συστήματος γείωσης) σε μΗ, που υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο [15],

α είναι μία σταθερά ίση με 0,85,

di/dt είναι μία τυχαία μεταβλητή που δεικνύει την κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος σε kA/μs και

*I*_{peak} είναι μία τυχαία μεταβλητή που δεικνύει τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος σε kA.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι θεωρείται ότι κατά την προσβολή μιας γραμμής από κεραυνό το ρεύμα του διαμοιράζεται εξίσου προς τις δύο κατευθύνσεις και ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης τιμής και της κλίσης μετώπου του κεραυνικού ρεύματος. Επιπλέον η συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος αποτελεί άθροισμα τόσο αυτής της γείωσης του πύργου όσο και αυτής του ιδίου του πύργου όταν ο τελευταίος διαρρέετε από κρουστικό ρεύμα.

Τέλος να σημειωθεί ότι και για τον υπολογισμό των σφαλμάτων ανάστροφης διάσπασης χρησιμοποιήθηκαν μηνιαίες μετεωρολογικές τιμές και μηνιαίες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων αποσκοπώντας στη μεγαλύτερη ακρίβεια των εκτιμούμενων σφαλμάτων. Έτσι υπολογίζεται ο μηνιαίος αριθμός σφαλμάτων λόγω ανάστροφης διάσπασης σε μία γραμμή μεταφοράς σύμφωνα με τροποποίηση της σχέση (3.11) αντικαθιστώντας τον αριθμό των κεραυνών που πλήττουν τη γραμμή N_L , με το μηνιαίο αριθμό των κεραυνών που πλήττουν την γραμμή N_{Lm} και δίνεται από τη σχέση:

$$N_{Lm} = 0,004 \cdot 2,386 \cdot T_m^{1,35} \cdot \left(g + 4 \cdot H^{1,09}\right)$$
(3.13)

3.4.3 Συνολικά κεραυνικά σφάλματα

Τα συνολικά κεραυνικά σφάλματα N_T μιας γραμμής μεταφοράς δίνονται από το άθροισμα των σφαλμάτων λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} και των σφαλμάτων λόγω ανάστροφης διάσπασης N_{BF} δηλαδή:

$$N_{T} = N_{SF} + N_{BF}$$
(3.14)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους τα συνολικά κεραυνικά σφάλματα υπολογίζονται (σύμφωνα με τη σχέση (3.14)) ξεχωριστά για κάθε μία περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια, αφού λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής.

3.5 Ανάπτυξη υπολογιστικού πακέτου (λογισμικού)

Ένα υπολογιστικό πακέτο (λογισμικό) αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς της προτεινόμενης μεθοδολογίας της παραγράφου 3.4, που εκτιμά την κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Το λογισμικό είναι φιλικό προς το χρήστη, απλό και ευέλικτο σε αλλαγές και τροποποιήσεις. Έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει εκτός από τους τύπους πύργων, τα επίπεδα μόνωσης και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και λήφθηκαν υπόψη στην υπολογιστική διαδικασία, οποιαδήποτε αλλά χαρακτηριστικά. Το λογισμικό που παρουσιάζεται στο απλό διάγραμμα ροής του σχήματος 3.4 περιγράφεται ως εξής:

- α) Εισαγωγή και αποθήκευση δεδομένων για ολόκληρη τη γραμμή μεταφοράς. Γενικά χαρακτηριστικά όπως: το μέσο ύψος των αγωγών προστασίας (H), η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας (g), το μήκος της γραμμής μεταφοράς (l), η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού με (D) και χωρίς corona (d), το ύψος των αγωγών φάσης στον πύργο (h_c) το επίπεδο μόνωσης (U_a), η συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος (L) εισάγονται στο υπολογιστικό εργαλείο μία φορά για όλη την γραμμή. Επιπλέον ο χρήστης καθορίζει της περιοχές στις οποίες χωρίζεται η γραμμή μεταφοράς.
- β) Εισαγωγή και αποθήκευση της κεραυνικής στάθμης (T). Η κεραυνική στάθμη για κάθε μία περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής εισάγεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα για κάθε ένα μήνα του έτους.
- γ) Χρήση της καταγεγραμμένης κατά την κατασκευή αντίσταση γείωσης του πύργου (R) (περίπτωση I) ή των παραμέτρων της ειδικής αντίστασης του

εδάφους (ρ_i, h) (περίπτωση ΙΙ) για κάθε περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς.

- δ) Στην περίπτωση Ι η καταγεγραμμένη αντίσταση γείωσης των πύργων για κάθε μία περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής, όπως επίσης και ο μήνας που οι μετρήσεις της γείωσης πραγματοποιήθηκαν εισάγονται και αποθηκεύονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα. Τα δεδομένα αυτά καταγράφηκαν κατά την κατασκευή της γραμμής μεταφοράς.
- ε) Στην περίπτωση ΙΙ, οι παράμετροι της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ για ομοιόμορφο έδαφος, ρ₁, ρ₂ και h για διστρωματικό έδαφος), ο μήνας που πραγματοποιήθηκαν αυτές οι μετρήσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης πύργου (πλέγμα Ι ή πλέγμα ΙΙ) εισάγονται και αποθηκεύονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα για κάθε περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς.
- στ) Υπολογισμός της μηνιαίας αντίστασης γείωσης πύργου. Η μέση μηνιαία αντίσταση γείωσης πύργων υπολογίζεται για κάθε περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής χρησιμοποιώντας στους υπολογισμούς τα στοιχεία που εισήλθαν στο προηγούμενο βήμα. Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.2 χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η μηνιαία αντίσταση γείωσης πύργου είτε χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης, είτε την καταγεγραμμένη κατά την κατασκευή αντίσταση γείωσης πύργου.
- ζ) Υπολογισμός της μηνιαίας πυκνότητας των κεραυνών (N_{gm}) και του μηνιαίου αριθμού των κεραυνών που πλήττουν την γραμμή (N_{Lm}). Η πυκνότητα των κεραυνών και ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν την υπό ανάλυση γραμμή υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.10) και (3.13).
- η) Επιλογή των κεραυνικών παραμέτρων και προσομοίωση των κεραυνών. Οι παράμετροι του κεραυνού (I_{peak} και di/dt) που χρησιμοποιούνται στο

υπολογιστικό εργαλείο επιλέγονται τυχαία από τις πιθανοτικές κατανομές των μετρήσεων των K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger [44].





- θ) Τα σφάλματα λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας (N_{SF}) υπολογίζονται για κάθε περιοχή της υπό εξέταση γραμμής μεταφοράς σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4.1.
- Τα σφάλματα λόγω ανάστροφης διάσπασης (N_{BF}) υπολογίζονται για κάθε περιοχή της υπό εξέταση γραμμής μεταφοράς σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4.2.
- κ) Υπολογισμός και παρουσίαση των συνολικών σφαλμάτων (N_T) για κάθε περιοχή της υπό εξέταση γραμμής μεταφοράς σύμφωνα με την εξίσωση (3.14) της παραγράφου 3.4.3.

<u>3.6 Συμπεράσματα</u>

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στην παγκόσμια βιβλιογραφία, σχετικά με τη συμπεριφορά και προστασία των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης έναντι κεραυνοπληξίας, δίνοντας μία ολοκληρωμένη εικόνα της έως σήμερα έρευνας στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια αφού δόθηκε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία για την ακριβέστερη εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπόψη της τόσο την απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης όσο και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Η μεθοδολογία αυτή που συνδυάζει πολλές γνωστές τεχνικές, έχει ως κύριο πλεονέκτημα το γεγονός ότι εξετάζει την γραμμή μεταφοράς σε περιοχές και διεξάγει την ανάλυση σε κάθε μία από αυτές ξεχωριστά (και όχι σε όλο το μήκος της), κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για γραμμές όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι γραμμές διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές. Επιπλέον δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις μηνιαίες μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε γεωγραφικής περιοχής και της μηνιαίας αντίστασης γείωσης πύργων της κάθε περιοχής της υπό εξέταση γραμμής, που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Τέλος παρουσιάζεται ένα εύχρηστο και πολύ φιλικό για το χρήστη υπολογιστικό πρόγραμμα (πακέτο λογισμικού) που αναπτύχθηκε βασιζόμενο στην προτεινόμενη μεθοδολογία της παραγράφου 3.4, έτοιμο προς χρήση από εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας για τη σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.7 Βιβλιογραφία

- [1] AIEE Committee Report, "A method of estimating the lightning performance of transmission lines", AIEE Trans, vol. 69, pp. 1187-1196, 1950.
- [2] J. M. Clayton, F. S. Young, "Estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans on PAS, vol. 83, pp. 1102-1110, 1964.
- [3] J. G. Anderson, "Monte Carlo computer calculation of transmission-line lightning performance", AIEE Trans, vol. 80, pp. 414-420, 1961.
- [4] M.A. Sargent, M. Darveniza, "Lightning performance of double-circuit transmission lines", IEEE Trans on PAS, vol. 89, pp. 913-925, 1970.
- [5] M. Darveniza, F. Popolansky, E.R. Whitehead, "Lightning protection of UHV lines", Electra, no. 41, pp. 39-69, 1975.
- [6] C. Bouquegneau, M. Dubois, J. Trekat, "Probabilistic analysis of the lightning performance of high-voltage transmission lines", Journal of Electric Power Systems Research, vol. 102, no. 1-2, pp. 5-18, 1986.
- [7] 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, pp. 1725-1736, 1960.
- [8] R. Lundholm, R.B. Finn, W.S. Price, "Calculation of transmission line lightning voltages by field concepts", AIEE Trans on PAS, vol. 77, pp. 1271-1283, 1958.
- [9] P. Chowdhuri, S. Li, P. Yan, "Rigorous analysis of back-flashover outages caused by direct lightning strokes to overhead power lines", IEE Proc.-Gen. Tran. Distr., vol. 149, no. 1, pp. 58-65, 2002.
- [10] J. He, Y. Tu, R. Zeng, L.B. Lee, S.H. Chang, Z. Guan, "Numeral analysis for shielding failure of transmission line under lightning stroke", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 815-822, 2005.
- [11] J.H. Hagenguth, J.G. Anderson, "Factors affecting the lightning performance of transmission lines", AIEE Trans on PAS, pt. III, vol. 76, pp. 1379-1392, 1957.
- [12] C.R. Torres, "Lightning outages calculations for transmission lines", 11th International Symposium on High-Voltage Engineering, London, U.K., 1999.
- [13]L.V. Bewley, "Travelling waves on transmission systems", John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 2nd edition, 1951.

- [14]G.D. Breuer, A.J. Schultz, R.H. Schlomann, W.S. Price, "Field studies of the surge response of a 345-kV transmission tower and ground wire", AIEE Trans on PAS, pt. III, vol. 76, pp. 1392-1396, 1957.
- [15]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, pp. 919-927, 1985.
- [16] IEEE Working Group Report on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, "Estimating lightning performance of transmission lines II updates to analytical models", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, 1993.
- [17] F.A.M. Rizk, "Modelling of transmission line exposure to direct lightning strokes", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1983-1997, 1990.
- [18] M.E. Almeida, M.T. Correia de Barros, "Modelling the hysteresis behaviour of the transmission tower footing", 9th International Symposium on High-Voltage Engineering, Graz, Austria, 1995.
- [19] T. Yamada, A. Mochizuki, J. Sawada, E. Zaima, "Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 393-402, 1995.
- [20] A.P.S. Meliopoulos, R. Cooper, "Transmission line lightning performance based design", IEEE Power Engineering Society Meeting, vol. 4, pp. 2898-2903, 2000.
- [21] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Murotani, T. Higuchi, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 6, no.3, pp. 1327-1333, 1991.
- [22] T. Yamada, A. Mochizuki, J. Sawada, E. Zaima, T. Kawamura, A. Ametani, M. Ishii, S. Kato, "Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 10, no.1, pp. 393-401, 1995.
- [23]B. Vahidi, S.E. Naghibi, "Tower model for lightning overvoltage analysis by EMTP", 26th International Conference on Lightning Protection, pp. 242-244, Cracow, 2002.
- [24] S.J. Shelemy, D.R. Swatek, "Monte-Carlo simulation of lightning strikes to the Nelson river HVDC transmission lines", IPST01 Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

- [25]I.M. Dudurych, T.J. Gallagher, J. Corbett, M.V. Escudero, "EMTP analysis of the lightning performance of a HV transmission line", IEE Proc.-Gen. Tran. Distr., vol. 150, no. 4, pp. 501-506, 2003.
- [26] J.A. Martinez, F. Castro-Aranda, "Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 294-300, 2005.
- [27] J.A. Martinez-Velasco, F. Castro-Aranda, "Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the ATP", MedPower04, Cyprus, 2004.
- [28]L.A. Kraft, "Modelling lightning performance of transmission systems using PSpice", IEEE Trans on Power Systems, vol. 6, no.2, pp. 543-549, 1991.
- [29]G.W. Brown, "Lightning performance I, shielding failures simplified", IEEE Trans on PAS, vol. 97, no. 1, pp. 33-38, 1978.
- [30] G.W. Brown, "Lightning performance II, updating backflash calculations", IEEE Trans on PAS, vol. 97, no. 1, pp. 39-52, 1978.
- [31] J.T. Whitehead, "Lightning performance of TVA's 500 kV and 161 kV transmission lines", IEEE Trans on PAS, vol. 102, no. 3, pp. 752-768, 1983.
- [32] A.C. Liew, P.C. Thun, "Comparative studies of lightning performance of a quadruple-circuit dual voltage 275/132 kV transmission line design with wooden crossarms", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 1973-1980, 1993.
- [33] T. Udo, "Estimation of lightning shielding failures and mid-span back-flashovers based on the performance of EHV double circuit transmission lines", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 12, no. 2, pp. 832-836, 1997.
- [34] A.P.S. Meliopoulos, W. Adams, R. Casey, "An integrated backflashover model for insulation coordination of overhead transmission lines", Elsevier Science, Electrical Power & Energy Systems, vol. 19, no. 4, pp. 229-234, 1997.
- [35] A.M. Mousa, K.D. Srivastana, "Modelling of power lines in lightning incidence calculations", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 5, no. 1, pp. 303-310, 1990.
- [36] M. Abedi, B. Vahidi, M.B. Chatri, "A PC based interactive software for lightning performance evaluation of transmission lines and its application to insulators of 400 kV in Iran", 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, 1991.
- [37] J.G. Anderson, "Transmission line reference book. 345 kV and above", Chapter 12, 2nd edition, Electric Power Research Institute, pp. 545-597, Palo Alto, CA, 1982.

- [38] H. Torres, M. Vargas, J. Herrera, E. Perez, C. Younes, L. Gallero, J. Montana, M.T. Correia de Barros, "Comparative study of two methodologies for evaluating the lightning performance of transmission lines applied in tropical zone", International Conference on Lightning Protection, Cracow, Poland, 2002.
- [39] R. Billinton, R.N. Allan, "Reliability evaluation of engineering systems", 2nd edition, New York, Plenum Press, 1994.
- [40] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system", 1983.
- [41] J.L. Del Alamo, "A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 1890-1899, 1993.
- [42]I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithm", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 100-106, 2005.
- [43] Ι.Φ. Γκόνος, Β.Θ. Κονταργύρη, Ι.Α. Σταθόπουλος, Π.Α. Κονταξής, Α.Ξ. Μορώνης, "Μεταβολή της πολυστρωματικής δομής του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους", Ελληνική Επιτροπή της CIGRE, σελίδες 209-216, Αθήνα, 2005.
- [44]K. Berger, R.B. Anderson, H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes", Electra, no. 41, pp. 23-37, 1975.
- [45]CIGRE Working Group 01 of Study Committee 33, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", CIGRE Tech. brochures, no. 63, 1991.
- [46] E. Garbagnati, E. Giudice, G.B. Lopiparo, "Messung von Blitzstromen in Italien - Ergebnisse einer statistischen Auswertung", ETZ, no. 11, pp. 664-668, 1978.
- [47] A. Borghetti, C.A. Nucci, M. Paolone, "Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 19, no. 3, 2004.
- [48]L. Ekonomou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, E.N. Dialynas, "A backflashover model for calculating the transmission lines' lightning performance", 12th International Symposium on High-Voltage Engineering, Bangalore, India, 2001.
- [49] Λ. Οικονόμου, Δ. Ηρακλέους, Ι. Γκόνος, Ι. Σταθόπουλος, "Ανάπτυξη μεθόδων υπολογισμού κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης", Ελληνική Επιτροπή της CIGRE, σελίδες 239-246, Αθήνα, 2003.

- [50] L. Ekonomou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "An improved backflashover model for estimating the lightning performance of transmission lines", 38th International Universities Power Engineering Conference, Thessaloniki, Greece, pp. 109-112, 2003.
- [51]I.F. Gonos, L. Ekonomou, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "Probability of backflashover in transmission lines due to lightning strokes", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 25, no. 2, pp. 107-111, 2003.
- [52]L. Ekonomou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, F.V. Topalis, "Lightning performance evaluation of Hellenic high voltage transmission lines", 13th International Symposium on High-Voltage Engineering, P.05-Transients & EMC, Delft, The Netherlands, 2003.
- [53]L. Ekonomou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Lightning performance evaluation of Hellenic high voltage transmission lines", IEE Proc. Generation Transmission and Distribution, (τελεί υπό έγκριση, GTD-2006-0005).

Κεφάλαιο 4

Υπολογισμός Κεραυνικών Σφαλμάτων με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί διεθνώς πολύ προσοχή στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία και χρησιμοποιούνται για την επίλυση πολλών προβλημάτων, λόγω της υπολογιστικής τους ταχύτητας, της ικανότητάς τους να χειρίζονται σύνθετες μη γραμμικές συναρτήσεις και της μεγάλης αποτελεσματικότητά τους, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν πλήρεις πληροφορίες για το υπό μελέτη πρόβλημα.

Ο υπολογισμός της κεραυνικής συμπεριφοράς εναέριων γραμμών μεταφοράς παρουσιάζει πολλές απροσδιοριστίες λόγω της τυχαίας φύσης των κεραυνικών φαινόμενων και την έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων. Αν και όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες για την επίλυση αυτού του προβλήματος, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία νέα μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποφεύγοντας τις πολύπλοκες, προσεγγιστικές και εμπειρικές εξισώσεις δίδοντας λύσεις που σχετίζονται μόνο με πραγματικά καταγεγραμμένα στοιχεία των υπό εξέταση γραμμών.

4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μέθοδοι που επεξεργάζονται πληροφορίες. Συνήθως εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά στοιχεία ή λογισμικό προσομοίωσης. Ο κύριος σκοπός των νευρωνικών δικτύων είναι η βελτίωση της ικανότητας των υπολογιστών να πάρουν αποφάσεις, με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτό του ανθρώπινου εγκεφάλου, για τον οποίο οι συμβατικοί υπολογιστές είναι ακατάλληλοι [1]. Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων επεξεργασίας αποκαλούμενων νευρώνες ή κόμβοι. Τα στοιχεία επεξεργασίας συνδέονται μεταξύ τους με άμεσες συνδέσεις γνωστές ως συναπτικά βάρη. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα αλλάζοντας τις τιμές των συνδέσεών τους.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος περιλαμβάνει ένα υψηλό αριθμό συνδεμένων συνόλων 10¹⁰ έως 10¹¹ βιολογικών νευρώνων κυτταρικών νεύρων, που μας βοηθούν στην αναπνοή, στην ανάγνωση, στην κίνηση και στη σκέψη [2]. Στα αρχικά στάδια της ζωής, μερικές από τις νευρωνικές δομές αναπτύχθηκαν μέσω της μάθησης, ενώ άλλες έμειναν ανεκμετάλλευτες [3]. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μια απλουστευμένη σχηματική δομή ενός βιολογικού νευρώνα. Υπάρχουν τρία κύρια δομικά στοιχεία στο βιολογικό νευρώνα. Το κυτταρικό σώμα, που εκτελεί τις λογικές διαδικασίες του βιολογικού νευρώνα αθροίζοντας και θέτοντας τα κατώτατα όρια των εισερχόμενων σημάτων, ο άξονας του νευρώνα που είναι μια ίνα νεύρων που συνδέεται με το κυτταρικό σώμα από το κυτταρικό σώμα σε άλλους βιολογικούς νευρώνες και τέλος οι δενδρίτες που είναι πολυδιακλαδισμένα δέντρα ινών συνδεόμενα με το κυτταρικό σώμα και μεταφέρουν τα ηλεκτρικά σήματα σε αυτό. Ο άζονας του βιολογικού νευρώνα συνδέεται με τους δενδρίτες άλλων κυττάρων μέσω των συνάψεων η σταθερότητα των οποίων καθορίζει τη λειτουργία του νευρωνικού δικτύου [4].

Όπως αναφέρθηκε, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από έναν αριθμό απλών τεχνητών νευρώνων. Το άθροισμα των σταθμισμένων εισόδων του νευρώνα

54

περνούν συνήθως μέσω μιας μη γραμμικής συνάρτησης για να δώσουν την έξοδο του.



Σχήμα 4.1: Δομή ενός βιολογικού νευρώνα.

Συγκρίνοντας το βιολογικό νευρώνα με τη βασική δομή ενός τεχνητού νευρώνα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το κυτταρικό σώμα αντικαθίσταται από τη μονάδα αθροίσματος και τη συνάρτηση μεταφοράς. Το σήμα στον άξονα του νευρώνα αντιπροσωπεύεται από την έξοδο του νευρώνα και τα βάρη του τεχνητού νευρώνα συσχετίζονται με τη σταθερότητα των συνάψεων.

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν πολλά και σημαντικά γνωρίσματα. Αποτελούνται από έναν αριθμό αλληλοσυνδεδεμένων νευρώνων με μη γραμμικές συναρτήσεις μεταφοράς έχοντας τη δυνατότητα να πραγματοποιούν μη γραμμικές απεικονίσεις. Αποτελούν ισχυρές μέθοδοι υπολογισμών λόγω της ευμεγέθης παράλληλης δομής τους, ενώ ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμά τους είναι η δυνατότητά τους να μαθαίνουν και να γενικεύουν. Τα βάρη του νευρωνικού δικτύου εκπαιδεύονται με ένα μέρος των στοιχείων που αποκαλείται σύνολο εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας είτε εποπτευόμενους είτε μη εποπτευόμενους αλγορίθμους μάθησης. Τα εκπαιδευμένα βάρη του δικτύου χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να προβλέψουν τιμές που δεν περιλαμβάνονται στο σύνολο εκπαίδευσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα εκπαιδευμένα βάρη μπορούν να παρέχουν μία αποδεκτή γενίκευση. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα έδωσαν τα κίνητρα στους ερευνητές να μελετήσουν και να εφαρμόσουν τα νευρωνικά δίκτυα στους ψηφιακούς υπολογιστές.

55

Το ενδιαφέρον για τα νευρωνικά δίκτυα χρονολογείται από τη δεκαετία του 1940 με την εργασία των W.S. McCulloch, W. Pitts [5]. Η εργασία αυτή θεωρείται ο πρόδρομος των νευρωνικών δικτύων. Οι συγγραφείς απέδειξαν ότι τα νευρωνικά δίκτυα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην προσέγγιση αριθμητικών ή λογικών συναρτήσεων προτείνοντας παράλληλα την πρώτη δομή τεχνητού νευρώνα. Σύμφωνα με την πρότασή τους, η έξοδος του νευρώνα έχει τιμή ένα, εάν το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων είναι μεγαλύτερο από μια κατώτατη τιμή, διαφορετικά έγει τιμή μηδέν. Στο τέλος της δεκαετίας του 1950 παρουσιάστηκε η πρώτη πρακτική εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, όταν ο E. Rosenblatt εφηύρε το perceptron και το σχετικό κανόνα μάθησής του [6] καταδεικνύοντας τη δυνατότητα του δικτύου να εκτελεί απλές αναγνωρίσεις προτύπων. Στην εργασία του, το νευρωνικό μοντέλο των McCulloch και Pitts οργανώθηκε σε στρώματα, ενώ αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος μάθησης για την ενημέρωση των βαρών που συνδέονται με το στρώμα εξόδου του δικτύου. Το perceptron ήταν η αιτία να διεξαχθούν πολλές έρευνες και τα νευρωνικά δίκτυα άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι τη δημοσίευση της εργασίας των M.L. Minsky, S.A. Papert [7]. Στο βιβλίο τους με τίτλο Perceptrons, έδειξαν ότι τα perceptrons δεν μπορούν να λύσουν οποιοδήποτε λογικό πρόβλημα εκτός αν αυτό είναι γραμμικά διαχωρίσιμο, συμβάλλοντας ουσιαστικά στον περιορισμό της έρευνας των νευρωνικών δικτύων κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, τόσο ο Τ. Kohonen [8], όσο και ο J.Α. Anderson [9] εφηύραν νέες νευρωνικές δικτυακές αρχιτεκτονικές που θα μπορούσαν να ενεργήσουν ως μνήμες. Ωστόσο οι σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα των νευρωνικών δικτύων σημειώθηκαν τη δεκαετία του 1980. Την περίοδο αυτή, οι προσωπικοί υπολογιστές και οι ισχυροί τερματικοί σταθμοί έγιναν ευρέως προσιτοί. Το 1980, ο J.J. Hopfield [10] πρότεινε ένα επανατροφοδοτούμενο νευρωνικό δίκτυο με κοινές συνδέσεις και την ιδέα μιας ενεργειακής συνάρτησης που μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτός ο τύπος επανατροφοδοτούμενου δικτύου είναι γνωστός ως δίκτυο Hopfield. Επιπλέον, η ανακάλυψη του αλγορίθμου μάθησης backpropagation [11] για την εκπαίδευση των πολυστρωματικών δικτύων perceptron από πολλούς διαφορετικούς ερευνητές διεύρυνε τη δυνατότητα εφαρμογής των νευρωνικών δικτύων. Σήμερα τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται σε έναν αυξανόμενο αριθμό πραγματικών προβλημάτων μεγάλης πολυπλοκότητας. Τα νευρωνικά δίκτυα, προσφέρουν ιδανικές λύσεις σε ποικίλα προβλήματα ταξινόμησης, στην πρόβλεψη συναρτήσεων, στη μοντελοποίηση συστημάτων με ιδιαίτερα σύνθετες φυσικές διαδικασίες κτλ. Πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές έχουν βρει τα ΤΝΔ και στην περιοχή των συστημάτων ισχύος.

Έτσι με τη βοήθεια πολυστρωματικών perceptrons (MLP) και του αλγόριθμου μάθησης backpropagation, πραγματοποιήθηκαν βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου [12], επανατροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση σταθεροποιητών συστημάτων ισχύος [12], ενώ λύσεις οικονομικών προβλημάτων συστημάτων ισχύος δόθηκαν με τη χρήση του δικτύου Hopfield [12]. Νευρωνικά δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση και εντοπισμό σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς [13-17], ενώ το MLP και ο αλγόριθμος μάθησης backpropagation συνέβαλλαν σημαντικά στην ανάλυση σταθερότητας της τάσης [18].

Επίσης τα ΤΝΔ παρουσιάζουν να έχουν εφαρμογές: στην επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος [19], σε μονωτήρες υψηλής τάσης για τον υπολογισμό τόσο της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης [20], όσο και για την εκτίμηση της σοβαρότητας της ρύπανσης κάτω από διάφορες καιρικές συνθήκες [21], και τέλος στον υπολογισμό των υπερτάσεων λόγω κεραυνών σε εναέριες γραμμές διανομής [22], χρησιμοποιώντας MLP και τους αλγόριθμους backpropagation και Levenberg-Marquardt.

4.3 Θεωρία τεχνητών νευρωνικών δικτύων

4.3.1 Τεχνητοί νευρώνες

4.3.1.1 Δομή νευρώνων

Όπως αναφέρθηκε, ο νευρώνας είναι η βασική δομή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Είναι η μονάδα πληροφορίας - επεξεργασίας γνωστή επίσης και ως κόμβος. Ο νευρώνας αποτελείτε από τρία βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι ένα σύνολο

συναπτικών βαρών, τα οποία αντιπροσωπεύουν τη σταθερότητα ή τη σύνδεση του νευρώνα. Τα βάρη εκπαιδεύονται και μπορούν να είναι θετικά, εάν η σχετική σύναψη είναι διεγερτική ή αρνητικά, εάν η σύναψη είναι ανασταλτική. Η αθροιστική μονάδα αποτελεί το δεύτερο συστατικό του νευρώνα, η οποία προσθέτει τις σταθμισμένες εισόδους και μεταβιβάζει τα αποτελέσματα συνήθως σε μια μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς. Τέλος το τρίτο βασικό στοιχείο αποτελεί η συνάρτηση ενεργοποίησης.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται μια γραφική απεικόνιση του νευρώνα, με το σύνολο εισόδων x_1 , x_2 ..., x_p , το σύνολο βαρών w_{k1} , w_{k2} ,..., w_{kp} και τη συνάρτηση ενεργοποίησης F. Τέλος το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης μια πολωμένη τιμή b_k που προστίθεται στην καθαρή είσοδο του νευρώνα. Κατά συνέπεια, η έξοδος του $k^{ioστoύ}$ νευρώνα καθορίζεται από τις εξισώσεις:

$$y_{k} = F(n_{k} + b_{k})$$

$$n_{k} = \sum_{i=1}^{p} w_{ki} x_{i}$$
(4.1)



Σχήμα 4.2: Το μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα.

Η πολωμένη τιμή μπορεί να συμπεριληφθεί ως άμεση είσοδος στο νευρώνα με την προσθήκη μιας πρόσθετης γραμμής εισόδου τιμής 1. Τόσο τα βάρη, όσο και η πολωμένη τιμή του νευρώνα είναι προσαρμοζόμενες κλιμακωτές παράμετροι.

4.3.1.2 Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι συνήθως μια μη γραμμική συνάρτηση που συγκρατεί το εύρος των εξόδων του νευρώνα σε ένα εύρος τιμών. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης. Ο πρώτος είναι η συνάρτηση κατώτατων ορίων. Σε αυτήν την περίπτωση, η έξοδος του νευρώνα μπορεί να είναι 1, εάν το άθροισμα των σταθμισμένων εισόδων και της πολωμένης τιμής είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 0. Διαφορετικά, η έξοδος του νευρώνα είναι 0. Επομένως:

$$y_{k} = \begin{cases} 1, & \epsilon \acute{\alpha} v W^{\mathrm{T}} X + b_{k} \ge 0 \\ 0, & \epsilon \acute{\alpha} v W^{\mathrm{T}} X + b_{k} < 0 \end{cases}$$
(4.2)

όπου W είναι το διάνυσμα των σταθμισμένων τιμών και X είναι το διάνυσμα των εισόδων.

Η τμηματική (piecewise) γραμμική συνάρτηση είναι ένας άλλος τύπος συνάρτησης ενεργοποίησης. Η έξοδος αυτής της συνάρτησης είναι 0, εάν το καθαρό άθροισμα των σταθμισμένων εισόδων είναι μικρότερο από -0,5, ή 1 εάν το καθαρό άθροισμα των σταθμισμένων εισόδων είναι μεγαλύτερο από 0,5, και γραμμικό στο εύρος -0,5 και 0,5. Επομένως, η έξοδος του νευρώνα καθορίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$y_{k} = \begin{cases} 1, & \epsilon \dot{\alpha} v \ W^{T} X + b_{k} \ge 0,5 \\ W^{T} X + b_{k}, & \epsilon \dot{\alpha} v - 0,5 < W^{T} X + b_{k} < 0,5 \\ 0, & \epsilon \dot{\alpha} v \ W^{T} X + b_{k} \le -0,5 \end{cases}$$
(4.3)

Ένας άλλος τύπος συνάρτησης ενεργοποίησης είναι η λογιστική συνάρτηση (logistic sigmoid) και αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των νευρωνικών δικτύων λόγω της μη γραμμικότητας και της διαφοροποίησή της. Η έξοδος του νευρώνα δίνεται από τη σχέση:

$$y_{k} = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot n_{k}}} \tag{4.4}$$

όπου α είναι η παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης και n_k είναι το καθαρό άθροισμα των σταθμισμένων εισόδων και της πολωμένης τιμής. Η έξοδος του νευρώνα κυμαίνεται από 0 έως 1.

4.3.2 Αρχιτεκτονικές δικτύων

Ένας και μόνο νευρώνας δεν μπορεί συνήθως να προβλέψει τις λειτουργίες ή να κατορθώσει να επεξεργαστεί τους διαφορετικούς τύπους πληροφοριών, λόγω του ότι η αποτελεσματικότητα του νευρωνικού δικτύου βασίζεται στη μαζική παράλληλη δομή του και στα διασυνδεόμενα βάρη του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν προταθεί παγκοσμίως πολλές διαφορετικές αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων. Οι κυριότερες αρχιτεκτονικές είναι τα μονοστρωματικά, τα πολυστρωματικά και τα ανατροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα.

4.3.2.1 Μονοστρωματικά νευρωνικά δίκτυα

Το σχήμα 4.3 παρουσιάζει τη δομή ενός μονοστρωματικού νευρωνικού δικτύου. Το δίκτυο έχει P εισόδους και S νευρώνες. Κάθε νευρώνας μπορεί να έχει τη δική του συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η ίδια συνάρτηση ενεργοποίησης για όλους τους νευρώνες. Τα βάρη σε αυτήν την περίπτωση οργανώνονται σε ένα πίνακα $S \times P$. Οι δείκτες των γραμμών του πίνακα βαρών αντιστοιχούν στους νευρώνες και οι δείκτες των στηλών αντιστοιχούν στις εισόδους. Επομένως, η σταθμισμένη τιμή w_{ij} αντιπροσωπεύει το βάρος που συνδέει τη $j^{iοστή}$ είσοδο στο $i^{iοστό}$ νευρώνα. Τα δίκτυα perceptron (παράγραφος 4.3.4) και τα δίκτυα προσαρμοζόμενων γραμμικών στοιχείων (παράγραφος 4.3.5) είναι παραδείγματα μονοστρωματικών νευρωνικών δομών.



Σχήμα 4.3: Μονοστρωματικό νευρωνικό δίκτυο.
4.3.2.2 Πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα

Ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το δίκτυο αποτελείται από τρία κύρια στρώματα. Το στρώμα εξόδου αντιστοιχεί στην τελική έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Οι είσοδοι απεικονίζονται στο δίκτυο ως νευρώνες εισόδου (δεδομένου ότι καμία μαθηματική διαδικασία δεν εκτελείται από τους νευρώνες αυτούς, δεν θεωρείται ως ξεχωριστό στρώμα). Κάθε στρώμα έχει τα δικά του βάρη, τους δικούς του πολωμένους όρους ί^{ιοστού} και συναρτήσεις μεταφοράς. Ο πίνακας βαρών του στρώματος αντιπροσωπεύεται από το W^i . Αν υποθέσουμε ότι το δίκτυο έχει P εξωτερικές εισόδους και S νευρώνες στο πρώτο στρώμα, τότε ο πίνακας βαρών του πρώτου στρώματος αντιπροσωπεύεται από το W_{S×P}. Οι έξοδοι του κρυμμένου στρώματος είναι οι είσοδοι στο επόμενο στρώμα. Η χρήση περισσότερων από ένα στρώματα μη γραμμικών μονάδων καθιστά το δίκτυο ισχυρότερο από τη χρήση μονοστρωματικού δικτύου.



Σχήμα 4.4: Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο.

4.3.2.3 Ανατροφοδοτούμενα νευρωνικά δίκτυα

Τα μονοστρωματικά και πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα καλούνται νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward), κυρίως επειδή όλες οι συνδέσεις πηγαίνουν είτε από το στρώμα εισόδου στο στρώμα εξόδου, είτε από το στρώμα

εισόδου στο κρυμμένο στρώμα, είτε τέλος από το κρυμμένο στρώμα στο στρώμα εξόδου. Στην περίπτωση των ανατροφοδοτούμενων νευρωνικών δικτύων, εκτός από τις πρόσθιες συνδέσεις υπάρχουν συνδέσεις ανατροφοδότησης που διαδίδουν τις πληροφορίες στην αντίθετη κατεύθυνση. Λόγω των συνδέσεων ανατροφοδότησης, τα ανατροφοδοτούμενα δίκτυα παρουσιάζουν δυνατότητες τέτοιες που δεν υπάρχουν στα πρόσθια, όπως είναι η αποθήκευση πληροφοριών για επόμενη χρήση [23].

4.3.3 Διαδικασία μάθησης

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν δυνατότητα μάθησης με προσαρμοστική ρύθμιση των συναπτικών βαρών τους χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο εκπαίδευσης. Η διαδικασία μάθησης ρυθμίζει τα βάρη του νευρωνικού δικτύου με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε όταν εισάγονται συγκεκριμένα δεδομένα στο δίκτυο, να παράγεται η επιθυμητή έξοδος. Η διαδικασία μάθησης αρχίζει με την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου στο δίκτυο. Το σύνολο όλων των δεδομένων εκπαίδευσης καλείται σύνολο εκπαίδευσης. Τα βάρη ρυθμίζονται και το δίκτυο αναμένεται να παράγει μια συγκεκριμένη έξοδο για κάθε δεδομένου εισόδου. Το σύνολο των επιθυμητών εξόδων καλείται τελικό σύνολο. Κάθε εισαγωγή των δεδομένων του συνόλου εκπαίδευσης στο δίκτυο μία φορά ονομάζεται εποχή (epoch).

Υπάρχουν δύο τύποι διαδικασιών για την μάθηση των νευρωνικών δικτύων, η μάθηση ανά δεδομένο (on-line) και η μάθηση ανά εποχή (off-line). Στη μάθηση ανά δεδομένο, τα βάρη ενημερώνονται έπειτα από την εισαγωγή κάθε δεδομένου στο δίκτυο. Στη μάθηση ανά εποχή, τα βάρη ενημερώνονται έπειτα από την εισαγωγή στο δίκτυο ολόκληρου του συνόλου δεδομένων της εποχής. Η μάθηση ανά δεδομένο είναι αυτή που συνήθως προτιμάται καθόσον ενισχύει τη στοχαστική πλευρά της εκπαίδευσης και βοηθάει στην αποτροπή της παγίδευσης του αλγορίθμου σε τοπικά ελάχιστα. Ωστόσο, η μάθηση ανά εποχή παρέχει έναν ακριβή υπολογισμό του διανύσματος κλίσης. Εν τέλει το είδος του προβλήματος είναι αυτό που καθορίζει την καταλληλότερη μορφή μάθησης.

4.3.3.1 Μάθηση «σφάλμα-διόρθωση» (error-correction)

Η μάθηση σφάλμα-διόρθωση είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους βασισμένη στο σήμα σφάλματος ανάμεσα στην επιθυμητή τιμή και την τιμή εξόδου του νευρωνικού δικτύου. Ως εκ τούτου, ο σκοπός της μάθησης σφάλμα-διόρθωση είναι να ταυτιστεί η τιμή εξόδου του δικτύου με αυτή της επιθυμητής τιμής. Μια ευρέως χρησιμοποιημένη συνάρτηση κόστους είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα [24] που καθορίζεται ως εξής:

$$J = E\left[\frac{1}{2}\sum_{k}e_{k}^{2}(t)\right]$$
(4.5)

όπου *E* είναι ο αναμενόμενος τελεστής και το e_k είναι το σήμα σφάλματος για τον $k^{\mu\sigma\tau\delta}$ νευρώνα. Η μέθοδος ελαχιστοποίησης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος *J*, όσον αφορά τις παραμέτρους του δικτύου, είναι γνωστή ως μέθοδος καθόδου κλίσης.

4.3.3.2 Μάθηση με επίβλεψη

Στη μάθηση με επίβλεψη ή μάθηση με δάσκαλο, το δίκτυο θεωρείται ότι έχει ένα εξωτερικό δάσκαλο, ο οποίος έχει γνώση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η έξοδος του δικτύου συγκρίνεται με τη σωστή απαιτούμενη τιμή. Έπειτα, τα συναπτικά βάρη του δικτύου ενημερώνονται χρησιμοποιώντας το σήμα σφάλματος.

Ένας από τους δημοφιλέστερους και πιο ισχυρούς αλγορίθμους μάθησης με επίβλεψη είναι ο backpropagation (αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος), που χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει τα πολυστρωματικά πρόσθια δίκτυα (feedforward). Ο αλγόριθμος έχει δύο φάσεις, την πρόσθια και την ανάστροφη φάση. Στην πρόσθια φάση, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται στο δίκτυο και οι έξοδοι του κρυμμένου στρώματος αποτελούν εισόδους στο επόμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου υπολογιστεί η τελική έξοδος. Στην ανάστροφη φάση, το σήμα σφάλματος υπολογίζεται και διαδίδεται προς τα πίσω για να ρυθμίσει τα βάρη, έτσι ώστε το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος να ελαχιστοποιείται. Η μαθηματική πολυπλοκότητα και οι χρονικές απαιτήσεις του αλγορίθμου αυξάνονται ανάλογα με το πλήθος του αριθμού των νευρώνων στα κρυμμένα στρώματα και στα στρώματα

εξόδου, όπως επίσης και του αριθμού των εισόδων. Αυτό αποτελεί και το μεγάλο μειονέκτημα του backpropagation και πολλών άλλων τεχνικών μάθησης. Το πρόβλημα αυτό υπερκεράζεται, χρησιμοποιώντας τη μάθηση χωρίς επίβλεψη.

4.3.3.3 Μάθηση χωρίς επίβλεψη

Σε αντίθεση με τη μάθηση με επίβλεψη, αυτή η οικογένεια των αλγορίθμων δεν απαιτεί τη χρήση των σωστών εξωτερικών τελικών τιμών για να ρυθμίσει τα βάρη του δικτύου. Επομένως, το δίκτυο λαμβάνει δεδομένα εισόδου και παράγει την έξοδο, χωρίς να δέχεται πληροφορίες από το εξωτερικό περιβάλλον, παρέχοντας όμως πληροφορίες στο δίκτυο για την ορθότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων ή για το πώς αυτά θα έπρεπε να ήταν. Για να είναι σε θέση να ταξινομήσει τα δεδομένα εισόδου, η μάθηση χωρίς επίβλεψη απαιτεί κάποιες επιπλέον πληροφορίες στα δεδομένα εισόδου [2]. Η μάθηση χωρίς επίβλεψη είναι επίσης γνωστή και ως αυτόοργανωμένη μάθηση, όπου μόνο οι τιμές εισόδου χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση.

4.3.4 Δίκτυο perceptron

Ιστορικά, το δίκτυο perceptron είναι ένα μονοστρωματικό νευρωνικό δίκτυο με βηματική συνάρτηση μεταφοράς κατωφλίου στην έξοδο του νευρώνα. Το δίκτυο perceptron εισήχθη από τον Ε. Rosenblatt προς το τέλος της δεκαετίας του 1950 [6]. Την ίδια εποχή, αναπτύχθηκαν από τους Β. Widrow, Μ.Ε. Hoff τα προσαρμοζόμενα γραμμικά στοιχεία (adaline) που ήταν εμπνευσμένα από τα perceptrons [25]. Τόσο το percepton, όσο και τα προσαρμοζόμενα γραμμικά στοιχεία μπορούν να επιλύουν μόνο γραμμικά διαχωρίσιμα προβλήματα. Η βασική δομή perceptron παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5 και βασίζεται στο τυπικό μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts.

Έστω ένα απλό δίκτυο perceptron με M εισόδους και ένα στρώμα εξόδου. Ορίζεται ως x_m η $m^{\iota o \sigma \tau \eta}$ είσοδος του δικτύου και ως y_k η $k^{\iota o \sigma \tau \eta}$ έξοδός του. Η έξοδος του δικτύου είναι:

$$y_k = f(n_k) = f\left(\sum_{i=1}^M w_{ki} x_i\right)$$
(4.6)

$$f(a) = \begin{cases} 1, & \varepsilon \dot{\alpha} v \ \alpha \ge 0\\ 0, & \delta \iota \alpha \varphi o \rho \varepsilon \tau \iota \kappa \dot{\alpha} \end{cases}$$
(4.7)

Η πολωμένη τιμή μπορεί είτε να προστεθεί στο δίκτυο ως εξωτερική παράμετρος, είτε προσθέτοντας μια πρόσθετη είσοδο με τιμή 1. Επομένως:

$$y_k = f\left(\sum_{i=1}^M w_{ki} x_i + b_k\right)$$
(4.8)



Σχήμα 4.5: Η δομή του δικτύου perceptron.

Ο σκοπός του δικτύου είναι να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη τιμή εξόδου y_k όταν εισάγεται ένα δεδομένο εισόδου στο δίκτυο. Επομένως, εάν η τελική τιμή είναι d_k, τότε:

$$y_k = d_k \tag{4.9}$$

4.3.4.1 Το κριτήριο perceptron

Το κριτήριο perceptron σχετίζεται με μια τμηματική γραμμική συνάρτηση σφάλματος. Είναι το άθροισμα όλων των στοιχείων που το δίκτυο αποτυγχάνει να ταξινομήσει. Ταξινομώντας τις εισόδους σε δύο κατηγορίες C_1 και C_2 , θέλουμε το δίκτυο να έχει μια τελική τιμή $d_k = +1$, εάν το διάνυσμα εισόδου ανήκει στην

και

κατηγορία C_1 και $d_k = -1$, εάν το διάνυσμα εισόδου ανήκει στην κατηγορία C_2 . Αυτό σημαίνει ότι, θέλουμε $W^T X \ge 0$ για τα διανύσματα εισόδου στην κατηγορία C_1 και $W^T X < 0$ για τα διανύσματα εισόδου στην κατηγορία C_2 . Επομένως, το perceptron προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την ακόλουθη συνάρτηση σφάλματος [26]:

$$E^{Per}(W) = -\sum_{X' \in \mu} W^T X^t d^t$$
(4.10)

όπου μ είναι το σύνολο όλων των διανυσμάτων εισόδου X^t που έχουν καταχωρηθεί εσφαλμένα, και d είναι το διάνυσμα των τελικών τιμών. Σαφώς, η συνάρτηση σφάλματος έχει μηδενική τιμή όταν όλα τα δεδομένα εισόδου ταξινομούνται σωστά. Επομένως, όταν η εκπαίδευση αρχίζει, το όριο απόφασης που καθορίζεται από τα διανύσματα εισόδου για τα οποία η καθαρή είσοδος είναι μηδέν, δηλ. $W^T X^t = 0$ κινείται έτσι, ώστε τα δεδομένα εισόδου που έχουν καταχωρηθεί εσφαλμένα να ταξινομηθούν σωστά και να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση σφάλματος με τη μείωση του συνόλου των δεδομένων που συμβάλλουν στο άθροισμα.

4.3.4.2 Αλγόριθμος μάθησης perceptron

Ο αλγόριθμος μάθησης αρχίζει με την εισαγωγή ενός προς ενός των δεδομένων εισόδου. Για κάθε δεδομένο εισόδου, η έξοδος του κάθε νευρώνα ελέγχεται με την τελική της τιμή. Εάν η έξοδος είναι σωστή, η σύνδεση δεν αλλάζει. Στην περίπτωση που η έξοδος δεν είναι σωστή, το βάρος που αντιστοιχεί σε εκείνη την έξοδο αλλάζει με την προσθήκη μιας μικρής τιμής ως εξής:

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \Delta w_{jk}(t) = w_{jk}(t) - \eta \frac{\partial E^{Per}}{\partial w_{kj}}$$
(4.11)

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο καθόδου κλίσης στο κριτήριο perceptron έχουμε:

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \eta x_k(t) d_j(t)$$
(4.12)

όπου η είναι ο ρυθμός μάθησης, $x_k(t)$ είναι η k^{looth} είσοδος του δικτύου σε χρόνο t και $d_j(t)$ είναι η επιθυμητή τιμή εξόδου σε χρόνο t.

4.3.4.3 Γραμμική διαχωριστικότητα

Το δίκτυο perceptron δεν μπορεί να συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή εξόδου εκτός αν τα δεδομένα εισόδου είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. Αυτό σημαίνει ότι, για κάθε έξοδο του δικτύου υπάρχει ένα όριο απόφασης (hyperplane) που μπορεί να διαχωρίσει τα δεδομένα εισόδου με θετικές εξόδους, από τα δεδομένα εισόδου με αρνητικές εξόδους.



Σχήμα 4.6: Όριο απόφασης perceptron.

Θεωρώντας ένα δίκτυο perceptron με δύο εισόδους x_1 και x_2 , μια έξοδο και με βάρη που αντιπροσωπεύονται από ένα διάνυσμα δύο στοιχείων w_1 και w_2 , τότε η έξοδος του δικτύου ορίζεται ως:

$$y = \begin{cases} 1, & \epsilon \dot{\alpha} v \quad w_1 x_1 + w_2 x_2 \ge 0\\ 0, & \epsilon \dot{\alpha} v \quad w_1 x_1 + w_2 x_2 < 0 \end{cases}$$
(4.13)

Επομένως, η εξίσωση $w_1 x_1 + w_2 x_2 = 0$ καθορίζει μια γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων και χωρίζει τα δεδομένα εισόδου σε δύο κατηγορίες. Εάν μια πολωμένη τιμή προστεθεί στο δίκτυο, τότε έχουμε:

$$y = \begin{cases} 1, & \varepsilon \dot{\alpha} v \quad w_1 x_1 + w_2 x_2 + b \ge 0\\ 0, & \varepsilon \dot{\alpha} v \quad w_1 x_1 + w_2 x_2 + b < 0 \end{cases}$$
(4.14)

Η εξίσωση $w_1 x_1 + w_2 x_2 + b = 0$, καθορίζει μια γραμμή που περνά από τα σημεία:

$$x_1 = -\frac{b}{w_1} \tag{4.15}$$

και

$$x_2 = -\frac{b}{w_2}$$
(4.16)

για x_2 και x_1 ίσα με μηδέν και κάθετα στο διάνυσμα των βαρών W. Η τιμή $w_1x_1+w_2x_2+b$ θα είναι θετική για ένα δεδομένο εισόδου που βρίσκεται στην κατεύθυνση του διανύσματος βαρών και μηδέν για ένα δεδομένο εισόδου που βρίσκεται σε αντίθετη κατεύθυνση από την κατεύθυνση του διανύσματος βαρών. Η επίδραση της πολωμένη τιμής είναι εκείνη η οποία αποτρέπει το όριο απόφασης να μην περάσει από την αρχή των αξόνων (σχήμα 4.6).

4.3.5 Αλγόριθμος μάθησης backpropagation (ανάστροφης διάδοσης σφάλματος)

Η εκπαίδευση backpropagation είναι ο δημοφιλέστερος και γνωστότερος αλγόριθμος μάθησης νευρωνικών δικτύων. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκπαιδεύσει τα πολυστρωματικά πρόσθια νευρωνικά δίκτυα, γνωστά και ως πολυστρωματικά perceptrons (MLP) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο καθόδου κλίσης. Ο αλγόριθμος μάθησης αναπτύχθηκε από πολλούς διαφορετικούς ερευνητές. Μελετήθηκε από τον P. Werbos το 1974 [27], έπειτα από τον D.B. Parker το 1985 [28] και ανακαλύφθηκε πάλι εκ νέου από τους D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams το 1986 [11].

Τα μονοστρωματικά νευρωνικά δίκτυα έχουν αρκετούς περιορισμούς λόγω του ότι μπορούν να αντιπροσωπεύσουν περιορισμένο εύρος συναρτήσεων. Τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα από την άλλη μπορούν να προσεγγίσουν τις λογικές συναρτήσεις με οποιοδήποτε επιθυμητό βαθμό ακρίβειας. Στην πραγματικότητα, ένα πολυστρωματικό δίκτυο μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση χρησιμοποιώντας μόνο δύο στρώματα νευρώνων [29]. Ωστόσο λόγω της έλλειψης ενός ισχυρού και αποτελεσματικού αλγορίθμου μάθησης, ήταν λίγοι οι ερευνητές που ενδιαφέρθηκαν για αυτά. Έπειτα από την εργασία του D.E. Rumelhart και των συναδέλφων του, το ενδιαφέρον για τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα αυξήθηκε και ο αλγόριθμος backpropagation αποτέλεσε κομβικό σημείο για τη μάθηση των νευρικών δικτύων.

Το σχήμα 4.7 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική δομή ενός διστρωματικού νευρωνικού δικτύου perceptron (ένα στρώμα εξόδου και ένα κρυμμένο στρώμα), όπου οι είσοδοι συμβολίζονται με το δείκτη k, οι έξοδοι με το δείκτη i, και οι κρυμμένοι νευρώνες με το δείκτη j. Επίσης συμβολίζεται ο αριθμός των εισόδων ως M, ο αριθμός των εξόδων ως N, και ο αριθμός των κρυμμένων μονάδων ως S. Τέλος το y αντιπροσωπεύει τις N-οστές εξόδους του στρώματος εξόδου και το x τις M-οστές εισόδους του δικτύου. Υπάρχουν δύο σύνολα πινάκων που αντιπροσωπεύουν τα βάρη του δικτύου. Ο πίνακας βαρών που συνδέει τους νευρώνες εισόδου (με το κρυμμένο στρώμα να αντιπροσωπεύεται από το W_{jk}^1 και να έχει $S \times M$ στοιχεία) και ο πίνακας βαρών που συνδέει τους νευρώνες τιμές του (συμβολίζεται ως W_{ij}^2 και περιλαμβάνει $N \times S$ στοιχεία). Οι πολωμένες τιμές του δικτύου μπορούν είτε να αντιπροσωπευθούν χωριστά στο νευρωνικό δίκτυο, είτε προσθέτοντας μια πρόσθετη είσοδο τιμής 1 για κάθε στρώμα του δικτύου.

Εάν ένα δεδομένο εισόδου *p* δοθεί στο δίκτυο, ο κρυμμένος νευρώνας *j* λαμβάνει μία καθαρή είσοδο *n_j* που ορίζεται ως:

$$n_{j}^{p} = \sum_{k=1}^{M} w_{jk}^{1} x_{k}^{p}$$
(4.17)

και η έξοδος της μονάδας αυτής είναι:

$$V_{j}^{p} = f(n_{j}^{p}) = f(\sum_{k=1}^{M} w_{jk}^{1} x_{k}^{p})$$
(4.18)

όπου το fείναι συνήθως μια μη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς.



Σχήμα 4.7: Διστρωματικό πρόσθιο νευρωνικό δίκτυο

Η έξοδος του κρυμμένου στρώματος είναι είσοδος στο επόμενο στρώμα που είναι το στρώμα εξόδου στην περίπτωση αυτή. Επομένως, η καθαρή είσοδος στη μονάδα εξόδου *i* είναι:

$$n_i^p = \sum_{j=1}^S w_{ij}^2 V_j^p = \sum_{j=1}^S w_{ij}^2 f(\sum_{k=1}^M w_{jk}^1 x_k^p)$$
(4.19)

και η μονάδα εξόδου ί παράγει την ακόλουθη τιμή εξόδου:

$$y_i^p = f(n_i^p) = f(\sum_{j=1}^S w_{ij}^2 V_j^p) = f(\sum_{j=1}^S w_{ij}^2 f(\sum_{k=1}^M w_{jk}^1 x_k^p))$$
(4.20)

Πρέπει να αναφερθεί, ότι η συνάρτηση μεταφοράς στο στρώμα εξόδου μπορεί να είναι διαφορετική από τη συνάρτηση μεταφοράς στο κρυμμένο στρώμα. Εντούτοις, για λόγους ευκολίας θα υποθέσουμε ότι είναι ίδιες σε όλα τα στρώματα του δικτύου.

Ο αλγόριθμος αρχίζει αρχικοποιώντας τα βάρη και τις πολωμένες τιμές του δικτύου με μικρές τυχαίες τιμές. Έπειτα, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο υπολογίζει τις τιμές εξόδου που παράγονται σε κάθε στρώμα, οι οποίες και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο επόμενο στρώμα. Αφού υπολογιστούν οι τελικοί έξοδοι, στη συνέχεια καθορίζονται τα σήματα σφάλματος. Τα σήματα σφάλματος διαδίδονται στην ανάστροφη φορά για να ενημερώσουν τις τιμές του πίνακα βαρών. Αυτή είναι η εκπαίδευση ανά δεδομένο (on-line), που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους για μικρές τιμές του ρυθμού μάθησης σύμφωνα

με την τοπική κλίση. Από την άλλη, η εκπαίδευση ανά εποχή (off-line), όπου τα βάρη ενημερώνονται μόνο όταν εισαχθούν όλα τα δεδομένα εισόδου στο δίκτυο, απαιτεί πρόσθετη μνήμη σε κάθε τμήμα. Επομένως, η εκπαίδευση ανά δεδομένο είναι γρηγορότερη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ μεγάλου συνόλου εκπαίδευσης. Τόσο η εκπαίδευση ανά δεδομένο, όσο και η εκπαίδευση ανά εποχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν λύσεις σε διαφορετικά προβλήματα, αν και για τα συνήθη σύνολα εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης backpropagation ανά δεδομένο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα [2].

4.3.5.1 Γενίκευση

Τα νευρωνικά δίκτυα αρχικοποιούνται συνήθως με τυχαίες τιμές βαρών και πολωμένων τιμών. Έπειτα, το δίκτυο εκπαιδεύεται ενημερώνοντας τις παραμέτρους του μέσω της εισαγωγής των δεδομένων εισόδου-εξόδου. Στο τέλος της εκπαίδευσης το δίκτυο αναμένεται να έχει γενικευθεί. Γενίκευση ονομάζεται η δυνατότητα του νευρωνικού δικτύου να δώσει σωστές τιμές εξόδου συγκεκριμένης ακρίβειας για δεδομένα εισόδου που δεν ανήκουν στο σύνολο εκπαίδευσης.

Στα νευρωνικά δίκτυα, ο συσχετισμός εισόδου-εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ως μία μη γραμμική απεικόνιση και η διαδικασία μάθησης ως ένα πολυβάθμιο πρόβλημα συσχέτισης καμπυλών. Το σχήμα 4.8 (α) παρουσιάζει τη γραφική συσχέτιση εισόδου-εξόδου με μη γραμμική απεικόνιση. Στην περίπτωση αυτή, το σύνολο εκπαίδευσης επιλέγεται κατάλληλα για να καλύψει όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Άρα, αν επιλέξουμε δεδομένα εισόδου που δεν ανήκουν στο σύνολο εκπαίδευσης, το δίκτυο θα κατορθώσει να δώσει μια καλή προσέγγιση σε σχέση με τη σωστή τιμή εξόδου. Επομένως, το δίκτυο λέγεται ότι «γενικεύει» καλά σε όλα τα διαφορετικά μέρη του χώρου εισόδου. Αντίθετα, το σχήμα 4.8 (β) παρουσιάζει την περίπτωση όπου το σύνολο εκπαίδευσης δεν καλύπτει κατάλληλα όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Επομένως, το δίκτυο σίγουρα θα δώσει κακή γενίκευση όταν επιλέγονται δεδομένα εισόδου έξω από το σύνολο εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.8: (α) καλή γενίκευση (β) κακή γενίκευση.

Η δυνατότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από μια καλή επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που έχουν ισχυρή επίδραση στην απόδοση της γενίκευσης των νευρωνικών δικτύων, όπως είναι η πολυπλοκότητα της συνάρτησης απεικόνισης, ο μικρός αριθμός κρυμμένων νευρώνων που μπορεί να οδηγήσει σε φτωχή πρόβλεψη για στοιχεία έξω από το σύνολο εκπαίδευσης, όπως επίσης και ο μεγάλος αριθμός κρυμμένων στρωμάτων που δημιουργεί θόρυβο στο σύνολο εκπαίδευσης [29].

4.3.5.2 Αλγόριθμος μάθησης backpropagation και δομή δικτύων

Τα πλεονεκτήματα των πολυστρωματικών πρόσθιων νευρωνικών δικτύων που εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο μάθησης backpropagation μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως. Ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε δύσκολα μη γραμμικά προβλήματα, όπως επίσης και σε διαφορετικά προβλήματα χωρίς την ανάγκη συγκεκριμένης τροποποίησης. Δεδομένου ότι η μαθηματική λύση των μη γραμμικών προβλημάτων απαιτεί σύνθετη μαθηματική ανάλυση, η μη γραμμική δομή των πολυστρωματικών νευρικών δικτύων και η δύναμη του αλγορίθμου backpropagation μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν ευκολότερα τέτοια προβλήματα. Επιπλέον, τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα έχουν καλές δυνατότητες γενίκευσης και είναι κατάλληλα για παράλληλη επεξεργασία [1].

Μειονεκτήματα των πολυστρωματικών νευρωνικών δικτύων, που εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο backpropagation, αποτελούν η αργή σύγκλιση λόγω της αργής εκπαίδευσης του αλγορίθμου backpropagation και το γεγονός ότι για κάθε πρόβλημα πρέπει να καθοριστεί η δομή του δικτύου.

Καθορισμός του αριθμού των κρυμμένων στρωμάτων

Ο αλγόριθμος μάθησης backpropagation επηρεάζεται από τον αριθμό των στρωμάτων και τον αριθμό των νευρώνων σε κάθε στρώμα, δεδομένου ότι συμβάλλουν άμεσα στις υπολογιστικές απαιτήσεις του αλγορίθμου. Άρα η βέλτιστη δομή των πολυστρωματικών δικτύων περιλαμβάνει το πρόβλημα καθορισμού του αριθμού στρωμάτων και τον αριθμού νευρώνων σε κάθε στρώμα για να επιτευχθεί μία καλή γενίκευση.

Καθορισμός του αριθμού κρυμμένων νευρώνων

Είναι συνήθως εύκολο να επιλεγεί ο αριθμός εισόδων και εξόδων ενός δικτύου, αφού αυτά αλληλεπιδρούν με το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, η επιλογή του αριθμού κρυμμένων νευρώνων δεν είναι τετριμμένη διαδικασία και δεν μπορεί να γίνει εκ των προτέρων. Η συνηθέστερη μέθοδος καθορισμού του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων είναι μια προσέγγιση δοκιμής-σφάλματος [4].

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων οι οποίες και ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες. Η κατηγορία του προσδιορισμού του αριθμού των νευρώνων κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και η κατηγορία του προσδιορισμού του αριθμού των νευρώνων μετά την εκπαίδευση. Στην πρώτη κατηγορία το δίκτυο κατασκευάζεται με έναν πολύ μεγάλο αριθμό κρυμμένων νευρώνων. Έπειτα οι περιττές μονάδες αφαιρούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της μάθησης [30] με την εξέταση των εξόδων των κρυμμένων νευρώνων. Ο νευρώνας θεωρείται περιττός εάν η έξοδός του μένει σταθερή μετά από κάποια βήματα και επομένως αφαιρείται. Ακόμα, εάν δύο νευρώνες οδηγούν στα ίδια αποτελέσματα ή έχουν αντίθετες τιμές, τότε απαιτείται μόνο ένας από τους δύο, μιας και οι δύο συμβάλλουν στην ίδια λύση.

Μια παραλλαγή του αλγόριθμου backpropagation που ρυθμίζει δυναμικά τον αριθμό των κρυμμένων νευρώνων έχει προταθεί στο [31]. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, το δίκτυο αρχίζει με έναν αρχικό αριθμό κρυμμένων νευρώνων. Κατόπιν, ένας νέος νευρώνας προστίθεται όταν κρίνεται σκόπιμο, ώστε το δίκτυο να αποφύγει τα τοπικά ελάχιστα. Συνεπώς, δεν υπάρχει ανάγκη να καθοριστεί ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος δεδομένου ότι το σύστημα θα τους ρυθμίσει αυτόματα.

Μια άλλη μέθοδος για τον καθορισμό του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων προτάθηκε από τους S.E. Fahlman, C. Lebiere [32]. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο αρχίζει μόνο με τις εισόδους και εξόδους χωρίς κανένα κρυμμένο νευρώνα. Έπειτα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, τα βάρη που συνδέουν τους νευρώνες εισόδου και εξόδου τροποποιούνται έτσι, ώστε το σφάλμα μεταξύ των εξόδων του δικτύου και των επιθυμητών τελικών τιμών να ελαχιστοποιείται. Εκτός από την τροποποίηση αυτή, προετοιμάζονται και οι υποψήφιοι κρυμμένοι νευρώνες με τις εισόδους τους να συνδέονται στους νευρώνες εισόδου και στους κρυμμένους νευρώνες που συνδέθηκαν πριν, ενώ οι έξοδοί τους αφήνονται αποσυνδεμένοι. Οι τροποποιήσεις στα βάρη των υποψήφιων κρυμμένων νευρώνων εκτελούνται έτσι, ώστε ο συσχετισμός των εξόδων των κρυμμένων νευρώνων και των επιθυμητών αποτελεσμάτων να μεγιστοποιείται. Όταν αυτός ο συσχετισμός κορεστεί, οι υποψήφιοι κρυμμένοι νευρώνες που παρουσιάζουν τη μέγιστη συσχέτιση συνδέονται στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή καθορίζονται τα βάρη που συνδέουν τους νευρώνες εισόδου με τους κρυμμένους νευρώνες, ενώ τροποποιούνται τα βάρη που συνδέουν τους κρυμμένους νευρώνες με τους νευρώνες εξόδου.

Η δεύτερη κατηγορία καθορίζει τον αριθμό των κρυμμένων νευρώνων μετά την εκπαίδευση και βασίζεται στον υπολογισμό της τάξης του πίνακα των βαρών, που ορίζεται ως η μικρότατη διάσταση, με μία από τις ελάσσονες ορίζουσες του πίνακα να μην μηδενίζεται και με όλες τις ελάσσονες ορίζουσες με μικρότερες διαστάσεις να μηδενίζονται. Εάν η έξοδος ενός κρυμμένου νευρώνα εκφράζεται ως γραμμικός συνδυασμός άλλων εξόδων νευρώνων, τότε αυτός ο κρυμμένος νευρώνας είναι περιττός και μπορεί να αφαιρεθεί από το δίκτυο. Συνεπώς ο απαραίτητος αριθμός κρυμμένων νευρώνων μπορεί να βρεθεί με τον υπολογισμό της τάξης του πίνακα

συνδιακύμανσης των εξόδων των κρυμμένων νευρώνων, κάτι που συμπίπτει με τη μικρότερη τιμή της τάξης του πίνακα βαρών ανάμεσα στους νευρώνες εισόδου και τους κρυμμένους νευρώνες και της τάξης του πίνακα συνδιακύμανσης των διανυσμάτων εισόδου [33].

Οι Μ. Kayama και λοιποί [34] καθόρισαν τον απαραίτητο αριθμό κρυμμένων νευρώνων, αναλύοντας τη συμπεριφορά τους χρησιμοποιώντας τη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης [35]. Η μέθοδος αρχίζει εκπαιδεύοντας το δίκτυο με ένα μεγάλο αριθμό κρυμμένων νευρώνων. Μετά από την εκπαίδευση, υπολογίζεται με στατιστική ανάλυση, ο αριθμός των γραμμικών τμημάτων καθορίζοντας τους κρυμμένους νευρώνες των οποίων οι έξοδοι μπορούν να διαμορφωθούν από το γραμμικό συνδυασμό άλλων εξόδων νευρώνων. Άρα ο βέλτιστος αριθμός κρυμμένων νευρώνων βρίσκεται με την αφαίρεση του αριθμού των γραμμικών τμημάτων από τον αρχικό αριθμό κρυμμένων νευρώνων.

4.3.5.3 Αλγόριθμος Levenberg-Marquardt

Τα πολυστρωματικά perceptrons μπορούν να εκπαιδευθούν χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εκπαίδευσης Levenberg-Marquardt [36-37] που είναι μια προσέγγιση της μεθόδου βελτιστοποίησης Newton. Έστω η συνάρτηση σφάλματος $E(\underline{w})$ που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί σε σχέση με το παραμετρικό διάνυσμα <u>w</u>. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος Newton ορίζεται ως εξής [38]:

$$\Delta \underline{w} = -[\nabla^2 E(\underline{w})]^{-1} \nabla E(\underline{w}) \tag{4.21}$$

όπου $\nabla^2 E(\underline{w})$ είναι ο πίνακας Hessian και $\nabla E(\underline{w})$ είναι η κλίση. Για το άθροισμα της συνάρτησης τετραγωνικού σφάλματος που ορίζεται ως:

$$E(\underline{x}) = \sum_{i=1}^{N} e(\underline{x})^2$$
(4.22)

η κλίση και ο πίνακας Hessian ορίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\nabla E(\underline{w}) = J^{T}(\underline{w})\underline{e}(\underline{w}) \tag{4.23}$$

και

$$\nabla^2 E(\underline{w}) = J^T(\underline{w})J(\underline{w}) + S(\underline{w})$$
(4.24)

αντίστοιχα. J(w) είναι ο Jacobian πίνακας που ορίζεται ως:

$$J(\underline{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1}(\underline{w})}{\partial w_{1}} & \frac{\partial e_{1}(\underline{w})}{\partial w_{2}} & \dots & \frac{\partial e_{1}(\underline{w})}{\partial w_{n}} \\ \frac{\partial e_{2}(\underline{w})}{\partial w_{1}} & \frac{\partial e_{2}(\underline{w})}{\partial w_{2}} & \dots & \frac{\partial e_{2}(\underline{w})}{\partial w_{n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{N}(\underline{w})}{\partial w_{1}} & \frac{\partial e_{N}(\underline{w})}{\partial w_{2}} & \dots & \frac{\partial e_{N}(\underline{w})}{\partial w_{n}} \end{bmatrix}$$
(4.25)

και

$$S(\underline{w}) = \sum_{i=1}^{N} e_i(\underline{w}) \nabla^2 e_i(\underline{w})$$
(4.26)

Η τελευταία παράμετρος θεωρείται μηδέν στη μέθοδο Gauss-Newton και επομένως η εξίσωση ενημέρωσης των βαρών είναι:

$$\Delta \underline{w} = \left[J^{T}(\underline{w}) J(\underline{w}) \right]^{-1} J^{T}(\underline{w}) e(\underline{w})$$
(4.27)

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται επανειλημμένα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση σφάλματος. Το πρόβλημα που εμφανίζεται με αυτήν την ενημέρωση είναι ότι δημιουργείται ένα μεγάλο μέγεθος βημάτων έχοντας ως αποτέλεσμα η εξίσωση ενημέρωσης να μην ακολουθεί πια γραμμική προσέγγιση. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση σφάλματος χρησιμοποιώντας μικρό μέγεθος βημάτων και κατά συνέπεια η εξίσωση ενημέρωσης ακολουθεί γραμμική προσέγγιση [29]. Επομένως, η τροποποιημένη εξίσωση του Levenberg-Marquardt είναι:

$$\Delta \underline{w} = \left[J^{T}(\underline{w}) J(\underline{w}) + \lambda I \right]^{-1} J^{T}(\underline{w}) e(\underline{w})$$
(4.28)

όπου Ι είναι ο μοναδιαίος πίνακας και το λ πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή β, όταν το μέγεθος των βημάτων προκαλεί μια αύξηση στη συνάρτηση σφάλματος και διαιρείται με β για μέγεθος βημάτων που συντελούν στη μείωση της συνάρτησης κόστους. Συνεπώς για μικρή τιμή του λ, χρησιμοποιούμε τον τύπο Newton, ενώ για μεγάλη χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο μάθησης backpropagation [29].

Ο Levenberg-Marquardt είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος μάθησης ιδιαίτερα όταν εφαρμόζεται σε νευρωνικά δίκτυα με μερικές εκατοντάδες βάρη. Ωστόσο μειονέκτημά του αποτελεί οι υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις του, λόγω των αντίστροφων πινάκων [38].

4.3.6 Δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function <u>networks)</u>

Μια άλλη σημαντική κατηγορία τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι τα δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function networks), τα οποία για συντομία ονομάζονται δίκτυα RBF [39]. Τα δίκτυα RBF είναι νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward) με ένα κρυμμένο επίπεδο, του οποίου οι μονάδες j (j = 1,..., M) υπολογίζουν μια ειδική συνάρτηση $h_j(x)$ του διανύσματος εισόδου. Συγκεκριμένα, η τιμή της εξόδου y_i (i = 1, ..., K) ενός δικτύου RBF με διάνυσμα εισόδου διάστασης $d x = (x_1, ..., x_d)^T$ είναι η εξής:

$$y_i(x) = \sum_{j=1}^{M} h_j(x) u_{ji} + u_{0i}$$
(4.29)

όπου *u_{ji}* είναι το βάρος της σύνδεσης από την κρυμμένη μονάδα *j* στη μονάδα εξόδου *i* και *u*_{0i} είναι η τιμή κατωφλίου της μονάδας εξόδου *i*.

Οι συναρτήσεις *h_j* ονομάζονται ακτινικές συναρτήσεις βάσης και έχουν συνήθως τη μορφή συναρτήσεων Gaussian:

$$h_j(x) = \exp\left(-\frac{\left|x - \mu_j\right|^2}{2\sigma_j^2}\right)$$
(4.30)

όπου το διάνυσμα $\mu_j = (\mu_{jl}, ..., \mu_{jd})^T$ καθορίζει το κέντρο της συνάρτησης βάσης, ενώ η παράμετρος σ_j καθορίζει την ακτίνα της συνάρτησης βάσης. Η συνάρτηση βάσης παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο κέντρο (δηλαδή για $x = \mu_j$) και η τιμή της ελαττώνεται εκθετικά καθώς απομακρυνόμαστε ακτινικά από το κέντρο.

Όπως είναι φανερό, οι παράμετροι (βάρη) του δικτύου RBF που πρέπει να καθοριστούν κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης είναι τα κέντρα μ_j (*M d* παράμετροι) και οι ακτίνες σ_j (*d* παράμετροι) των συναρτήσεων βάσης, καθώς και οι παράμετροι u_{ji} ((+1)*K* παράμετροι) του γραμμικού αθροίσματος [39].

4.3.6.1 Εκπαίδευση δικτύων RBF

Όπως και στην περίπτωση του πολυεπίπεδου perceptron, η εκπαίδευση ενός δικτύου RBF γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ πραγματικών και επιθυμητών εξόδων του δικτύου [39]. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές εκπαίδευσης, από τις οποίες οι σπουδαιότερες είναι οι εξής:

Εκπαίδευση δύο σταδίων

Στην προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης x αρχικά για τον καθορισμό των κέντρων και των ακτινών των συναρτήσεων βάσης (πρώτο στάδιο). Ο καθορισμός αυτός γίνεται χρησιμοποιώντας τεχνικές μάθησης χωρίς επίβλεψη, στις οποίες αγνοείται η πληροφορία σχετικά με την κατηγορία κάθε δεδομένου εκπαίδευσης. Συνήθως, χρησιμοποιούνται τεχνικές ανταγωνιστικής μάθησης, όπως ο αλγόριθμος των *k-μέσων* (k-means) ή ο αλγόριθμος LVQ.

Από τη στιγμή που έχουν καθοριστεί οι συναρτήσεις $h_j(x)$, το δεύτερο στάδιο της εκπαίδευσης έγκειται στον υπολογισμό των βαρών u_{ji} του γραμμικού αθροίσματος. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει εύκολα, με τεχνικές εκπαίδευσης γραμμικών ταξινομητών. Αυτό ισχύει διότι, αν είναι γνωστές οι συναρτήσεις h_j , το πρόβλημα ανάγεται στη γραμμική ταξινόμηση του νέου συνόλου εκπαίδευσης με δεδομένα $(h_1(x), ..., h_M(x))$ αντί των αρχικών δεδομένων x. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος της ελαχιστοποίησης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος [39].

Ενιαία εκπαίδευση

Εναλλακτικά, είναι δυνατή η ταυτόχρονη ενημέρωση όλων των παραμέτρων του δικτύου (δηλαδή των μ_j, σ_j και u_{ji}) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο καθόδου κλίσης ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ισχύει για το πολυστρωματικό perceptron (MLP). Φυσικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η ανά εποχή (off-line) είτε η ανά δεδομένο (on-line) ενημέρωση, σε πλήρη αναλογία με το MLP.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική της ενιαίας εκπαίδευσης θεωρείται σε γενικές γραμμές υποδεέστερη από την τεχνική των δύο σταδίων. Ειδικά στην περίπτωση που τα κέντρα και οι ακτίνες των συναρτήσεων βάσης αρχικοποιούνται εντελώς τυχαία, είναι πολύ δύσκολο για τη μέθοδο καθόδου κλίσης να ελαχιστοποιήσει επαρκώς το σφάλμα εκπαίδευσης λόγω της ύπαρξης πολλών τοπικών ελαχίστων. Στην περίπτωση, όμως, που τα κέντρα και οι ακτίνες έχουν αρχικοποιηθεί σε καλές τιμές, τότε η χρήση της μεθόδου καθόδου κλίσης για την ενημέρωση όλων των παραμέτρων οδηγεί σε πολύ καλές λύσεις. Μπορεί δηλαδή η μέθοδος των δύο σταδίων να τροποποιηθεί ώστε στο δεύτερο στάδιο να μεταβάλλονται όχι μόνο οι παράμετροι *u_{ji}*, αλλά και οι παράμετροι του πρώτου επιπέδου. Φυσικά, η δεύτερη προσέγγιση είναι υπολογιστικά πιο πολύπλοκη από την αρχική, αλλά οδηγεί πολλές φορές σε καλύτερες λύσεις, γιατί επιτρέπει την περαιτέρω ρύθμιση των παραμέτρων του πρώτου στρώματος με βάση το μέσο τετραγωνικό σφάλμα [39].

4.3.7 Σύγκριση MLP και RBF

Τόσο τα δίκτυα MLP όσο και τα RBF έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι υλοποιούν μη γραμμικές απεικονίσεις από το χώρο των εισόδων R^d στο χώρο των εξόδων R^K . Και τα δύο μοντέλα χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της παγκόσμιας προσέγγισης και, επομένως, μπορούν να προσεγγίσουν (με οσοδήποτε καλή ακρίβεια) οποιαδήποτε συνάρτηση, αν χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός κρυμμένων μονάδων. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται και από σημαντικές διαφορές οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν επιλέγεται ποιο από τα δύο δίκτυα θα χρησιμοποιηθεί [39].

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ MLP και RBF βρίσκεται στη μορφή των συναρτήσεων *h_i(x)* του κρυμμένου στρώματος. Κάθε κρυμμένη μονάδα του MLP

υπολογίζει το εσωτερικό γινόμενο των τιμών των εισόδων με το αντίστοιχο διάνυσμα βαρών και το αποτέλεσμα περνάει από τη συνάρτηση ενεργοποίησης της μονάδας. Το MLP υλοποιεί συναρτήσεις ταξινόμησης διαχωρίζοντας το χώρο των δεδομένων με υπερεπίπεδα και ορίζοντας τις περιοχές απόφασης ως τομές των υπερεπιπέδων αυτών (κάθε κρυμμένη μονάδα στο MLP ορίζει την εξίσωση ενός υπερεπιπέδου).

Επομένως, στον υπολογισμό μιας εξόδου συμμετέχουν όλες οι κρυμμένες μονάδες και το δίκτυο MLP μαθαίνει χρησιμοποιώντας κατανεμημένη αναπαράσταση, δηλαδή η γνώση σχετικά με την έξοδο που αντιστοιχεί σε κάποια είσοδο κατανέμεται στις τιμές των βαρών όλων των κρυμμένων μονάδων. Αυτό δίνει στα δίκτυα MLP την ιδιότητα της ανοχής σε σφάλματα (fault tolerance), που σημαίνει ότι η καταστροφή κάποιων συνδέσεων δεν είναι καταστροφική για το δίκτυο λόγω του ότι η γνώση είναι κατανεμημένη σε όλες τις συνδέσεις.

Αντίθετα, τα δίκτυα RBF λειτουργούν δημιουργώντας τοπικές αναπαραστάσεις, δηλαδή η γνώση σχετικά με την έξοδο που αντιστοιχεί σε κάποια είσοδο xενσωματώνεται στα βάρη εκείνων των κρυμμένων μονάδων οι οποίες περιλαμβάνουν το δεδομένο x στη σφαίρα επιρροής τους, δηλαδή αυτές για τις οποίες η ποσότητα $\exp(-|x-\mu_j|^2/\sigma_j^2)$ δεν είναι αμελητέα. Ισχύει, δηλαδή, στην περίπτωση των δικτύων RBF, ότι ο χώρος δεδομένων διαιρείται σε περιοχές, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια μονάδα του κρυμμένου επίπεδου. Αυτό είναι σε πλήρη αντιδιαστολή με την περίπτωση του δικτύου MLP, όπου κάθε περιοχή ορίζεται ως η τομή όλων των υπερεπιπέδων που ορίζονται από τις κρυμμένες μονάδες [39].

Αλλες διαφορές μεταξύ MLP και RBF είναι ότι τα δίκτυα MLP μπορούν να έχουν περισσότερα του ενός κρυμμένα στρώματα, ενώ τα δίκτυα RBF έχουν ακριβώς ένα κρυμμένο στρώμα. Επίσης, τα δίκτυα MLP εκπαιδεύονται με ενιαίο τρόπο (δηλαδή ταυτόχρονα ενημερώνονται όλα τα βάρη), ενώ τα δίκτυα RBF χρησιμοποιούν εκπαίδευση δύο σταδίων.

4.4 Ανάπτυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία η οποία και χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποσκοπεί στην ακριβή εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης [40-44]. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής σε σχέση με τις υπάρχουσες στην διεθνή βιβλιογραφία που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 3.2, έγκειται στο γεγονός ότι υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της μόνο πραγματικά στοιχεία των υπό εξέταση γραμμών και όχι εμπειρικές ή προσεγγιστικές εξισώσεις, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία κατασκευάζεται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (εκπαιδεύεται, επικυρώνεται και ελέγχεται), το οποίο και είναι σε θέση να εκτιμήσει τα κεραυνικά σφάλματα των γραμμών μεταφοράς του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αναπαριστά μία παράλληλη πολυστρωματική διάταξη επεξεργασίας πληροφοριών. Χαρακτηριστικό στοιχείο 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 εκπαίδευσης. Ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου καθορίζεται από την αρχιτεκτονική του δικτύου, τη συνάρτηση μεταφοράς και τον κανόνα μάθησης.

Στη μελέτη αυτή εξετάστηκαν πολλά μοντέλα δύο διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων, του πολυστρωματικού δικτύου perceptron (MLP) και των δικτύων ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF). Στη συνέχεια επιλέχθηκε για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, το μοντέλο εκείνο που παρουσίασε την καλύτερη ικανότητα γενίκευσης, είχε συμπαγή μορφή, γρήγορη διαδικασία εκπαίδευσης και χαμηλή κατανάλωση υπολογιστικής μνήμης.

Πέντε παράμετροι που συμβάλουν σημαντικά στην ύπαρξη κεραυνικών σφαλμάτων των γραμμών μεταφοράς επιλέχθηκαν ως είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο. Οι παράμετροι αυτοί είναι: το επίπεδο μόνωσης των γραμμών U_a , η αντίσταση γείωσης του πύργου R, η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος I_{peak} , η κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος di/dt και η κεραυνική στάθμη T. Ως έξοδος του νευρωνικού

δικτύου ορίστηκε ο αριθμός των κεραυνικών σφαλμάτων της γραμμής N_T (σχήμα 4.9). Τόσο τα δεδομένα εισόδου, όσο και τα δεδομένα εξόδου αποτελούν είτε πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, είτε εκτιμώμενα δεδομένα, βασισμένα σε πραγματικές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, το επίπεδο μόνωσης των γραμμών και ο αριθμός των κεραυνικών σφαλμάτων της γραμμής έχει γνωστοποιηθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. [45], ενώ η κεραυνική στάθμη έχει διατεθεί από την ΕΜΥ [46]. Το μέγιστο κεραυνικό ρεύμα και η κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος εκτιμώνται κεραυνικές πιθανοτικές κατανομές γρησιμοποιώντας τις παραμέτρων και χαρακτηριστικών, που παρουσιάστηκαν από τους K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger [47], σε συνδυασμό με τα γεωγραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα των υπό εξέταση περιοχών. Τέλος όσο αναφορά την αντίσταση γείωσης του πύργου, χρησιμοποιείται είτε η καταγεγραμμένη τιμή κατά την κατασκευή της γραμμής που διατίθεται από τη ΔΕΗ Α.Ε. [45], είτε μία εκτιμώμενη τιμή που προκύπτει χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος γείωσης και τις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.3.2.



Σχήμα 4.9: Η αρχιτεκτονική του κατασκευασμένου τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Για να εκπαιδευθούν τα μοντέλα MLP και RBF χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη

Νευρωνικών Δικτύων του υπολογιστικού προγράμματος ΜΑΤLAB [48].

Έχοντας αποφασίσει την αρχιτεκτονική του δικτύου (αριθμό εισόδων και εξόδων), το επόμενο βήμα για τα μοντέλα MLP είναι ο καθορισμός του αριθμού των κρυμμένων στρωμάτων, του αριθμού των νευρώνων σε κάθε στρώμα, της μεθόδου εκπαίδευσης και της συνάρτησης μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθούν. Δοκιμάζοντας ποικίλους συνδυασμούς αυτών των παραμέτρων, επιλέγεται η αρχιτεκτονική εκείνη η οποία παρουσιάζει την καλύτερη ικανότητα γενίκευσης. Αντίθετα τα μοντέλα RBF χρησιμοποιούν εξορισμού ένα κρυμμένο στρώμα, ενώ σε αυτό το είδος νευρωνικών δικτύων δοκιμάστηκε μόνο η πιο διαδεδομένη για τα RBF μέθοδος εκπαίδευσης (Gaussian) και συνάρτηση μεταφοράς (ελαχίστων τετραγώνων) ως οι πιο κατάλληλες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, για καλύτερη ικανότητα γενίκευσης.

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση, επικύρωση και έλεγχο των μοντέλων, αναφέρονται σε στοιχεία για κάθε μία από τις περιοχές των υπό ανάλυση γραμμών και για κάθε ένα ξεχωριστό μήνα μιας περιόδου τεσσάρων ετών. Η διαδικασία εκπαίδευσης επαναλαμβάνεται εωσότου επιτευχθεί μέσο τετραγωνικό σφάλμα 1%. Τέλος ο αριθμός των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων των υπό εξέταση γραμμών μεταφοράς ελέγχεται συγκρίνοντας τον με τον αριθμό σφαλμάτων που υπολογίστηκε από περιπτώσεις που συμπεριλήφθηκαν στην εκπαιδευτική διαδικασία (80% των δεδομένων) και άλλες που δεν είχαν συμπεριληφθεί (20% των δεδομένων).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και ιδιαίτερα για γραμμές τέτοιες, όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές όπου κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως η κεραυνική στάθμη και η αντίσταση γείωσης πύργων είναι σημαντικά διαφορετικά κατά μήκος των γραμμών.

4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αφού πραγματοποιήθηκε μία εκτενέστατη βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και των εφαρμογών τους σε συστήματα ισχύος, παρουσιάστηκε αναλυτικά η σχετιζόμενη με αυτά θεωρία, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στις αρχιτεκτονικές δικτύων, στις διαδικασίες μάθησης, στους αλγόριθμους μάθησης και σε δύο κυρίως είδη δικτύων, του πολυστρωματικού δικτύου perceptron (MLP) και του δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF).

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία για την ακριβέστερη εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, στα οποία ως δεδομένα εισόδου και εξόδου, για την εκπαίδευση του δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία ελληνικών εν λειτουργία γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η μεθοδολογία αυτή, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες στη διεθνή βιβλιογραφία μεθόδους εκτίμησης της κεραυνικής συμπεριφοράς, κρίνεται ιδιαίτερα ελκυστική αφού δεν υπεισέρχονται στους υπολογισμούς εμπειρικές ή προσεγγιστικές εξισώσεις παρά μόνο πραγματικά στοιχεία των υπό εξέταση γραμμών.

4.6 Βιβλιογραφία

- S. Abe, "Neural networks and fuzzy systems", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [2] J. Hertz, A. Krogh, R.G. Palmer, "Introduction to the theory of neural computation", Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991.
- [3] M.T. Hagan, H.B. Demuth, M. Beale, "Neural networks design", PWS Publishing Co., Boston, 1995.
- [4] A. Cichocki, R. Unbehauen, "Neural networks for optimization and signal processing", J. Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 1993.
- [5] W.S. McCulloch, W. Pits, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bul. Math. Biophys., vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [6] E. Rosenblatt, "Principles of neurodynamics", Spartan, New York, 1962.
- [7] M.L. Minsky, S.A. Papert, "Perceptrons", MIT Press, 1969.
- [8] T. Kohonen, "Correlation matrix memories", IEEE Trans Computation, vol. 21, pp.353-359, 1972.

- [9] J.A. Anderson, "A simple neural network generating interactive memory", Math. Biosc., vol. 14, pp. 197-220, 1972.
- [10] J.J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", Proc. Nat. Acad. Sci., vol. 79, pp. 2554-2558, 1982.
- [11] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, "Learning representation by backpropagating errors", Nature, vol. 323, pp. 533-536, 1986.
- [12] R. Aggarwal, Yonghua Song, "Artificial neural networks in power systems. III. Examples of applications in power systems", Power Engineering Journal, vol. 12, no. 6, pp. 279-287, 1998.
- [13] R.N. Mahanty, P.B.D. Gupta, "Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines", IEE Proc.- Gen. Tran. and Distr., vol. 151, no. 2, pp. 201-212, 2004.
- [14] Whei-Min Lin, Chin-Der Yang, Jia-Hong Lin, Ming-Tong Tsay, "A fault classification method by RBF neural network with OLS learning procedure", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 16, no. 4, pp. 473-477, 2001.
- [15] A.J. Mazon, I. Zamora, J. Gracia, K.J. Sagastabeutia, J.R. Saenz, "Selecting ANN structures to find transmission faults", IEEE Computer Applications in Power, vol. 14, no. 3, pp. 44-48, 2001.
- [16] S. Vasilic, M. Kezunovic, "An improved neural network algorithm for classifying the transmission line faults", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 918-923, 2002.
- [17] G. Gardoso, J.G. Rolim, H.H. Zurn, "Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 19, no. 3, pp. 1034-1041, 2004.
- [18] H.P. Schmidt, "Application of artificial neural networks to the dynamic analysis of the voltage stability problem", IEE Proc.-Gen. Trans. Distr., vol. 144, no. 6, pp. 371-376, 1997.
- [19] V.L. Paucar, M.J. Rider, "Artificial neural networks for solving the power flow problem in electric power systems", Journal of Electric Power Systems Research, vol. 62, pp. 139-144, 2002.
- [20] P. Cline, W. Lannes, G. Richards, "Use of pollution monitors with a neural network to predict insulator flashover", Journal of Electric Power Systems Research, vol. 42, pp. 27-33, 1997.

- [21] A.S. Ahmad, P.S. Ghosh, S.A.K. Aljunid, H.A.I. Said, H. Hussain, "Artificial neural network for contamination severity assessment of high voltage insulators under various meteorological conditions", AUPEC, Perth, 2001.
- [22] J.A. Martinez, F. Gonzalez-Molina, "Statistical evaluation of lightning overvoltages on overhead distribution lines using neural networks", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 1133-1138, 2001.
- [23] J.S. Draye, D.A. Pavisic, G.A. Cheron, G.A. Libert, "Dynamic recurrent neural networks: a dynamic analysis", IEEE Trans SMC-Part B, vol. 26, no. 5, pp. 692-706, 1996.
- [24] S.S. Haykin, "Neural networks: A comprehensive foundation", Prentice Hall, 2nd Edition, London, 1999.
- [25] B. Widrow, M.E. Hoff, "Adaptive switching circuits", IRE WESCOM Conv. Rec., vol. 4, pp. 96-104, 1960.
- [26] P.J. Werbos, "Backpropagation through time: what it is and how to do it", Proc. IEEE, vol. 78, no. 10, pp. 1550-1560, 1990.
- [27] P. Werbos, "Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behaviour sciences", PhD Thesis, Harvard University, 1974.
- [28] D.B. Parker, "Learning logic", Tech. Rep., TR-47, Center for Comput. Res. Econ.& Man. Sci., MIT, 1985.
- [29] C.M. Bishop, "Neural networks for pattern recognition", Clarendon Press, Oxford, 1997.
- [30] J. Sietsma, R.J.F. Dow, "Creating artificial neural networks that generalise", Neural Networks, vol. 4, no. 1, pp. 67-79, 1991.
- [31] Y. Hirose, K. Yamashita, S. Hijiya, "Backpropagation algorithm which varies the number of hidden units", Neural Networks, vol. 4, no. 1, pp. 61-66, 1991.
- [32] S.E. Fahlman, C. Lebiere, "The cascade correlation learning architecture", Advan. in Neur. Infor. Proces. Sys., vol. 2, Morgan Kaufmann, Denver, CO, pp. 524-532, 1990.
- [33] Q. Xue, Y. Hu, W.J. Tompkins, "Analysis of the hidden units of backpropagation model by singular value decomposition (SVD)", Proc. ICNN, vol. 1, Washington, pp. 739-742, 1990.
- [34] M. Kayama, S. Abe, H. Takenaga, Y. Morooka, "Dependency of generalisation capability for a multilayered neural network on its number of hidden units", Trans

Inst. Elec. Eng. Jap., vol. 113, no. 3, pp. 341-348, 1993.

- [35] K. Fukunaga, "Introduction to statistical pattern recognition", Academic Press, Boston, 1990.
- [36] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares", Quarterly of Applied Math., vol. 2, no. 2, pp. 164-168, 1944.
- [37] D.W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters", J. Soc. Ind. Appl. Math., vol. 11, no. 2, pp. 431-441, 1963.
- [38] M.T. Hagan, M.B. Menhaj, "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm", IEEE Trans on Neural Networks, vol. 5, pp. 989-993, 1994.
- [39] Α. Λύκας, "Υπολογιστική νοημοσύνη", Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 1999.
- [40] L. Ekonomou, D.P. Iracleous, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Lightning performance assessment of overhead high voltage transmission lines using an artificial neural network method", 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, U.K., 2004.
- [41] L. Ekonomou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Application and comparison of several artificial neural networks for evaluating the lightning performance of high voltage transmission lines", 14th International Symposium on High Voltage Engineering, China, 2005.
- [42] L. Ekonomou, D.P. Iracleous, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Lightning performance identification of high voltage transmission lines using artificial neural networks", International Journal of Engineering and Intelligent Systems, vol. 13, no. 3, 2005.
- [43] L. Ekonomou, I.F. Gonos, D.P. Iracleous, I.A. Stathopulos, "Application of artificial neural network methods for the lightning performance evaluation of Hellenic high voltage transmission lines", Journal of Electrical Power Systems Research, 2006, Έγινε <u>αποδεκτό</u> για δημοσίευση και είναι στην διαδικασία της <u>έκδοσης</u>.
- [44] L. Ekonomou, P. Liatsis, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Artificial neural network based software tool for calculating the lightning performance of high voltage transmission lines", IEE Proc. Science, Measurement and Technology, Έγινε <u>αποδεκτό</u> για δημοσίευση και είναι στην διαδικασία της <u>έκδοσης</u>.

- [45] ΔΕΗ Α.Ε., "Ετήσια έκθεση δραστηριότητας γραμμών μεταφοράς", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, 2004.
- [46] Στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Αθήνα, 2004.
- [47] K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger, "Parameters of lightning flashes", Electra, no. 41, pp. 23-37, 1975.
- [48] H. Demuth, M. Beale, "Neural network toolbox: For use with MATLAB", The Math Works, 1994.

Κεφάλαιο 5

Μέθοδος Σχεδίασης Γραμμών Μεταφοράς Υψηλής Τάσης για Ελαχιστοποίηση των Κεραυνικών Σφαλμάτων

5.1 Εισαγωγή

Η σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό θέμα στην κεραυνική συμπεριφορά μιας γραμμής μεταφοράς όχι μόνο λόγω του ότι διαφορετικές τιμές κατασκευαστικών στοιχείων επηρεάζουν σημαντικά την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών, αλλά επίσης γιατί είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν οποιεσδήποτε κατασκευαστικές βελτιώσεις και τροποποιήσεις σε υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς. Έτσι η σωστή σχεδίαση αποτελεί ίσως την καλύτερη «αντικεραυνική» προστασία των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού δοθούν εν συντομία μία ανασκόπηση των υπαρχόντων μεθόδων σχεδίασης και στοιχεία σχετικά με τη θεωρία βελτιστοποίησης, παρουσιάζεται μία μέθοδος για τη βέλτιστη σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής

τάσης λαμβάνοντας υπόψη της τόσο τα σφάλματα που οφείλονται σε απευθείας κεραυνοπληξία των γραμμών όσο και αυτών που οφείλονται σε ανάστροφη διάσπαση. Η προτεινόμενη μέθοδος σχετίζοντας το κόστος των κατασκευαστικών παραμέτρων επιπέδου μόνωσης και αντίστασης γείωσης πύργων με το κόστος των κεραυνικών σφαλμάτων, υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές του επιπέδου μόνωσης και της αντίστασης γείωσης πύργων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των γραμμών μεταφοράς, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κεραυνικά σφάλματα.

5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι W.S. Chang, C.D. Zinn [1] το 1976 όρισαν ένα ελάχιστο κόστος σχεδίασης για γραμμές μεταφοράς. Παρουσίασαν μία μεθοδολογία για την σχεδίαση μίας ηλεκτρικής γραμμής μεταφοράς κατασκευάζοντας ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο αναπαρίστανε το συνολικό κόστος της γραμμής ως συνάρτηση των κατασκευαστικών μεταβλητών της γραμμής. Οι I.S. Grant, R.E. Clayton [2] το 1987 ανάπτυξαν μία μεθοδολογία, η οποία χρησιμοποιήθηκε για να διερευνηθεί ο βαθμός ευαισθησίας της απαιτούμενης παρούσας αξίας προσόδου σε σχέση με διάφορες κατασκευαστικές μεταβλητές, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σχεδίαση στο ελάχιστο δυνατό κόστος.

Αξιοσημείωτη ήταν επίσης η εργασία των R.Ε. Kennon, D.Α. Douglass [3] το 1990, οι οποίοι πραγματοποιώντας μία πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη παρουσίασαν μία σειρά από τεχνικές βελτιστοποίησης γραμμών με βάση τις οποίες εύκολα γινόταν αντιληπτό εάν απαιτείτε για τις γραμμές μεταφοράς μια βέλτιστη σχεδίαση ή ήταν αρκετή η σύνηθες διαδικασία σχεδίασης. Το συμπέρασμα της μελέτης αυτής ήταν ότι ακόμα και οι απλούστερες μέθοδοι βελτιστοποίησης ήταν ικανές να διατηρήσουν τα κόστη σε χαμηλά επίπεδα. Οι Μ.Μ. Saied, Μ. Jaboori, D. El-Nakid [4] το 1990 παρουσίασαν μία μέθοδο για τη βέλτιστη σχεδίαση εναέριων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους των γραμμών, λαμβάνοντας υπόψη τους τόσο τους σχετικούς τεχνικούς περιορισμούς όσο και τα μεταβλητά και σταθερά κόστη. Οι Ν.Α. Katic, M.S. Savic [5] το 1998, ανέλυσαν από οικονομική πλευρά την κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών διανομής λαμβάνοντας υπόψη τους τόσο το κοινωνικό κόστος (κόστος των καταναλωτών) όσο και το κόστος των ηλεκτρικών εταιριών για κάθε σφάλμα της γραμμής.

Μια εναλλακτική μέθοδος σχεδίασης για εναέριες γραμμές μεταφοράς εισήχθη από τον Μ.Μ. Saied [6] το 1999. Βασίζονταν στο σχηματισμό δύο αναλυτικών εκφράσεων κλειστού τύπου τόσο για την ισχύ της γραμμής όσο και για τους υπολογισμούς των ρευμάτων σε σχέση με τα γεωμετρικά δεδομένα των πύργων της γραμμής και τους αγωγούς φάσης. Οι R. Holt, Τ.Τ. Nguyen [7] το 2000, πρότειναν μια γενική τυποποίηση εξισώσεων κλειστού τύπου για τις αποστάσεις έκθεσης των αγωγών φάσης μιας γραμμής μεταφοράς σε κεραυνικά πλήγματα. Σύμφωνα με τις εκφράσεις αυτές ανέπτυξαν μία μεθοδολογία για τον καθορισμό των βέλτιστων γωνιών προστασίας που εξασφαλίζουν μια αποτελεσματική προστασία υπό περιορισμούς όπως για παράδειγμα το ύψος των αγωγών φάσης και το μήκος των τραβερσών του πύργου.

Τέλος οι Τ.Τ. Nguyen, R. Holt [8] το 2003, αφού όρισαν ένα σύνολο περιορισμών που έπρεπε να ικανοποιηθούν έτσι ώστε όλοι οι αγωγοί φάσης να προστατευθούν αποτελεσματικά από απευθείας κεραυνοπληξία με τη χρήση αγωγών προστασίας, ανέπτυξαν μία βέλτιστη μέθοδο σχεδίασης για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους της τοποθέτησης των αγωγών προστασίας υπό την προϋπόθεση ικανοποίησης των περιορισμών.

5.3 Θεωρία βελτιστοποίησης συναρτήσεων

Η βελτιστοποίηση είναι ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται συχνά στην καθημερινή ζωή. Για παράδειγμα, στόχος κάθε εταιρίας είναι να μεγιστοποιήσει τα κέρδη της ή να ελαχιστοποιήσει το κόστος της. Η σκέψη ενός οδηγού σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι να μπορέσει ν' ακολουθήσει εκείνη τη διαδρομή που θα ελαχιστοποιήσει το χρόνο μετάβασης στον προορισμό του, κ.ο.κ.

Μαθηματικά, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης συνίσταται στη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης $f(x_b, ..., x_N)$ που ονομάζεται συνάρτηση στόχου ή

αντικειμενική συνάρτηση, με καθορισμό του διανύσματος $x = [x_1, ..., x_N]$ που δίνει αντίστοιχα τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της συνάρτησης στόχου [9].

Οι μεταβλητές x_j μπορεί να είναι ελεύθερες να πάρουν οποιαδήποτε τιμή (βελτιστοποίηση δηλαδή χωρίς περιορισμούς), ή μπορεί να περιορίζονται σε ορισμένες επιτρεπτές τιμές (βελτιστοποίηση με περιορισμούς). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα εξεταστούν μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

5.3.1 Ελαχιστοποίηση χωρίς περιορισμούς

5.3.1.1. Ελαχιστοποίηση συναρτήσεων μιας μεταβλητής

Το σχήμα 5.1 δίνει τη γραφική παράσταση μιας συνάρτησης μιας μεταβλητής f(x). Ένα σημείο x^* ονομάζεται ολικό ελάχιστο μιας συνάρτησης f(x) αν:

$$f(x^*) \le f(x) \tag{5.1}$$

για όλα τα x. Αν η ανισότητα (5.1) ισχύει μόνο για όλα τα x σε κάποια περιοχή γύρω από το x^* , τότε το σημείο x^* ονομάζεται τοπικό ελάχιστο της f(x).

Από τα μαθηματικά είναι γνωστό ότι τα τοπικά ακρότατα μιας συνάρτησης θα πρέπει ν' αναζητηθούν στα άκρα του διαστήματος ορισμού της ή στα κρίσιμα σημεία της συνάρτησης, δηλαδή στα σημεία στα οποία μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος (στάσιμα σημεία) ή στα σημεία στα οποία δεν ορίζεται η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης.

Αν η f(x) είναι συνεχής συνάρτηση και έχει συνεχείς πρώτες και δεύτερες παραγώγους για όλα τα x γύρω από το x*, οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για να είναι το x* τοπικό ελάχιστο της f(x) είναι:

$$\frac{df(x^*)}{dx} = 0 \tag{5.2}$$

$$\frac{d^2 f(x^*)}{dx^2} > 0$$
 (5.3)

και

Αριθμητικές μέθοδοι ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

Το απλούστερο πρόβλημα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς γράφεται ως εξής:

$$Min f(x) \tag{5.4}$$

όπου η συνάρτηση μιας μεταβλητής f(x) είναι η συνάρτηση στόχου.



Σχήμα 5.1: Κρίσιμα σημεία συνάρτησης μιας μεταβλητής.

Ο υπολογισμός της τιμής x* που ελαχιστοποιεί την *f(x)* μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να γίνει με απ' ευθείας επίλυση της, εν γένει μη γραμμικής, εξίσωσης (5.2) με μια επαναληπτική μέθοδο, π.χ. τη μέθοδο Newton:

$$x^{k+1} = x^{k} - \left(\frac{d^{2}f(x^{k})}{dx^{2}}\right)^{-1} \frac{df(x^{k})}{dx} \qquad k = 0, 1, 2, \dots$$
 (5.5)

αρχίζοντας από κάποια αρχική τιμή x^0 για το x.

Η επίλυση της (5.2) για πολύπλοκες συναρτήσεις παρουσιάζει δυσκολίες. Ακόμη κι αν υπολογιστεί με τις επαναλήψεις (5.5) μια λύση για τη (5.2) αυτή θα είναι απλά ένα στάσιμο σημείο (μηδενισμού της πρώτης παραγώγου) της συνάρτησης *f(x)*. Ανάλογα με την αρχική επιλογή του x^0 , οι επαναληπτικές εξισώσεις (5.5) μπορεί να συγκλίνουν στα σημεία x_A , x_B , ή x_Γ που είναι όλα στάσιμα σημεία της συνάρτησης του σχήματος 5.1. Η επίλυση, λοιπόν, της (5.2) δεν εγγυάται την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης (5.4). Θα πρέπει να ελεγχθεί και η συνθήκη (5.3).

Η μέθοδος των κλίσεων

Η μέθοδος των κλίσεων εντοπίζει ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης f(x) ως εξής: Αρχίζοντας με την αρχική τιμή x^{θ} , υπολογίζεται η κλίση της f(x), $\frac{df(x^{\theta})}{dx}$. Έπειτα προχωρώντας κατά την αντίθετη κατεύθυνση της κλίσης $-\frac{df(x^{\theta})}{dx}$ κατά ένα βήμα a_{θ} υπολογίζεται η νέα τιμή x^{I} . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Ο αλγόριθμος των κλίσεων περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$x^{k+1} = x^k - a_k \frac{df(x^k)}{dx} \qquad k = 0, 1, 2, \dots$$
(5.6)

όπου τα $\alpha_k > 0$. Η διαδικασία (5.6) συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο της f(x) αν τα α_k επιλεγούν έτσι ώστε:

$$f(x^{k+1}) < f(x^k)$$

για όλα τα k, δηλαδή αν η συνάρτηση ελαττώνεται σε κάθε βήμα. Η δυσκολία της μεθόδου είναι στον υπολογισμό της ακολουθίας των βημάτων { a_k , k = 0, 1, ...} για να υπάρξει γρήγορη σύγκλιση. Η επιλογή ενός σταθερού και αρκετά μικρού βήματος { a_k = a, k = 0, 1, ...} εγγυάται μεν τη σύγκλιση της μεθόδου αλλά χρειάζονται πολλές επαναλήψεις.

Ως κριτήριο τερματισμού συνήθως λαμβάνεται η σχέση:

$$\left|\frac{df(x^k)}{dx}\right| < \varepsilon \tag{5.7}$$

όπου ε ένας μικρός θετικός αριθμός. Δηλαδή η διαδικασία τερματίζει όταν σχεδόν μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος (5.2) [9].

5.3.1.2 Ελαχιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών

και

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης μιας μεταβλητής, μπορούν εύκολα να γενικευθούν και για την ελαχιστοποίηση συνάρτησης πολλών μεταβλητών, $f(x_1, x_2, ..., x_N)$, αν θεωρηθεί η συνάρτηση ως συνάρτηση ενός διανύσματος, f(x) με $x = [x_1, x_2, ..., x_N]$. Πρέπει όμως πρώτα να γενικευθεί η έννοια της πρώτης και δεύτερης παραγώγου για την περίπτωση συνάρτησης ενός διανύσματος ορίζοντας την κλίση και τον πίνακα Hessian της συνάρτησης ως εξής:

$$\nabla_{x} f(x) = \frac{df(x)}{dx} = \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_{1}} \cdots \frac{\partial f(x)}{\partial x_{N}}\right]$$
(5.8)

$$H_{f}(x) = \frac{d^{2}f(x)}{dx^{2}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{1}^{2}} & \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{1}\partial x_{2}} & \cdots & \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{1}\partial x_{N}} \\ \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{2}\partial x_{1}} & & \ddots & \\ \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{N}\partial x_{1}} & & & \frac{\partial^{2}f}{\partial x_{N}^{2}} \end{bmatrix}$$
(5.9)

Παρατηρείται στις (5.8) και (5.9) ότι η πρώτη παράγωγος μιας (βαθμωτής) συνάρτησης ως προς ένα διάνυσμα, είναι ένα διάνυσμα που ονομάζεται κλίση της συνάρτησης ενώ η δεύτερη παράγωγος μιας συνάρτησης ως προς ένα διάνυσμα είναι ένας πίνακας Hessian.

Με τους παραπάνω ορισμούς της κλίσης και του πίνακα Hessian μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες ελαχίστου (5.2) και (5.3) της προηγούμενης παραγράφου γενικεύονται εύκολα ως εξής: Το διάνυσμα $x^* = [x_1^* ... x_N^*]$ είναι ένα τοπικό ελάχιστο της $f(x) = f(x_1, ..., x_N)$ όταν:

$$\nabla_x f(x) = 0_N \tag{5.10}$$

και $H_f(x)$ είναι θετικά ορισμένος πίνακας όπου $\theta_N = [0 \ 0 \dots 0]$ είναι ένα διάνυσμα με N μηδενικά στοιχεία. Ένας πίνακας H είναι θετικά ορισμένος όταν για κάθε μη μηδενικό διάνυσμα x ισχύει $x H x^T > 0$.

Οι συνθήκες μηδενισμού της κλίσης της συνάρτησης (5.10) μπορούν αναλυτικά να γραφούν ως εξής:

$$\frac{df(x_1, \cdots, x_N)}{dx_i} = 0 \qquad i = 1, \cdots, N$$
(5.11)

Αριθμητικές μέθοδοι

Η απ' ευθείας επίλυση του συστήματος των, εν γένει μη γραμμικών, εξισώσεων (5.10), ή ισοδύναμα (5.11), με τη μέθοδο Newton για τον υπολογισμό ενός στάσιμου σημείου της συνάρτησης f(x) γίνεται με τον αναδρομικό τύπο:

$$x^{k+1} = x^k - \nabla_x f(x^k) H_f(x^k)^{-1} \qquad k = 0, 1, \dots$$
(5.12)

όπου x^{θ} αρχικά επιλεγμένο διάνυσμα.

Η σχέση (5.12) είναι απ' ευθείας γενίκευση της σχέσης (5.5) της προηγούμενης παραγράφου. Ισχύουν κι εδώ οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.1.1. Τώρα μάλιστα χρειάζεται στην (5.12) ο υπολογισμός και η αντιστροφή του πίνακα των δεύτερων παραγώγων που σε πολλές εφαρμογές παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία.

Η μέθοδος των κλίσεων

Η μέθοδος των κλίσεων εντοπίζει ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης f(x) ως εξής: Αρχίζει με ένα αρχικό διάνυσμα x^0 και υπολογίζει την κλίση της f(x), $\nabla_x f(x^0)$. Έπειτα προχωρά κατά την αντίθετη κατεύθυνση της κλίσης $-\nabla_x f(x^0)$ κατά ένα βήμα a_0 και υπολογίζουμε τη νέα τιμή x^1 . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Ο αλγόριθμος των κλίσεων περιγράφεται από τις σχέσεις:
$$x^{k+1} = x^k - a_k \nabla_x f(x^k) \qquad k = 0, 1, 2, \dots$$
(5.13)

όπου x^0 αρχικά επιλεγμένο διάνυσμα και $a_k > 0$.

Ως κριτήριο τερματισμού συνήθως λαμβάνεται η σχέση:

$$\left\|\nabla_{x}f(x^{k})\right\| < \varepsilon \tag{5.14}$$

όπου ε είναι ένας μικρός θετικός αριθμός και $\left\| \nabla_x f(x^k) \right\|$ μια norm του διανύσματος

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdots \frac{\partial f}{\partial x_N}\right], \qquad \delta \eta \lambda \alpha \delta \eta \qquad \|\nabla f\| = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2\right)} \qquad \dot{\eta}$$
$$\|\nabla f\| = \max_{i=1,N} \left\{ \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right] \right\} \ \dot{\eta} \ \|\nabla f\| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left|\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|.$$

Παρατηρείται ότι οι σχέσεις (5.13) και (5.14) είναι απ' ευθείας γενίκευση των σχέσεων (5.6) και (5.7) της προηγούμενης παραγράφου. Ισχύουν και εδώ οι δυσκολίες για τον προσδιορισμό του α_k που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.1.1.

Η μέθοδος των κλίσεων που λέγεται αλλιώς και μέθοδος της ταχυτέρας καθόδου έχει μια ενδιαφέρουσα γεωμετρική ερμηνεία στην περίπτωση ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης δύο μεταβλητών $f(x_1, x_2)$. Έστω ότι υπάρχει ένας ορειβάτης στην πλαγιά ενός βουνού με πολλή ομίχλη. Ο ορειβάτης θέλει να κατεβεί το βουνό όσο γίνεται πιο γρήγορα. Θέλει δηλαδή να φθάσει στο σημείο ελάχιστου ύψους. Εδώ η $f(x_1, x_2)$ δηλώνει το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο ορειβάτης. Τι πρέπει να κάνει αφού δεν έχει καλή ορατότητα; Θα αρχίσει από την αρχική θέση (x_1^0, x_2^0) και θα δει γύρω του για να εντοπίσει την κατεύθυνση της μέγιστης (προς τα κάτω) κλίσης του βουνού, $-\nabla f(x_1^0, x_2^0)$. Μετά θα κάνει έναν ορισμένο αριθμό βημάτων - έστω πέντε - κατά την κατεύθυνση $-\nabla f(x_1^0, x_2^0)$, και θα συνεχίσει τη διαδικασία έως ότου φτάσει σε επίπεδο έδαφος με $\nabla f(x_1, x_2) \approx 0$ [9].

5.4 Ανάπτυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μία νέα μεθοδολογία σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, για τη βέλτιστη επιλογή κατασκευαστικών στοιχείων των γραμμών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που οφείλονται τόσο στην απευθείας κεραυνοπληξία αγωγών φάσης, όσο και στο φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης [10].

Γενικότερα υπάρχουν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για τη σχεδίαση μιας γραμμής μεταφοράς. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί μία καλή αντίσταση γείωσης πύργου και ένα σχετικά χαμηλό επίπεδο μόνωσης, ενώ η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί μία μέτρια αντίσταση γείωσης πύργου αλλά ένα σχετικά υψηλό επίπεδο μόνωσης [11]. Πέρα από αυτή τη γενική διαπίστωση η σχεδίαση γραμμών μεταφοράς μπορεί να αναφερθεί και σε πολλά άλλα κατασκευαστικά στοιχεία όπως για παράδειγμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πύργων και των αγωγών, των γωνιών τοποθέτησης των αγωγών προστασίας, του αριθμού αγωγών προστασίας κ.τ.λ., τα οποία αναμφίβολα συμβάλλουν στην καλύτερη προστασία της γραμμής.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εξετάζει μόνο δύο χαρακτηριστικά, το επίπεδο μόνωσης της γραμμής και την αντίσταση γείωσης των πύργων. Ο λόγος ήταν ότι θεωρήθηκαν δεδομένοι οι τύποι και το είδος των πύργων, καθώς επίσης και οι αγωγοί προστασίας και οι γωνίες αυτών μιας και αυτά τα στοιχεία είναι τυποποιημένα για λόγους ομοιομορφίας από τις ηλεκτρικές εταιρίες. Να σημειωθεί ότι εύκολα θα μπορούσε η μεθοδολογία να γενικευθεί και να συμπεριλάβει περισσότερες παραμέτρους αρκεί να είναι διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα.

Στην παρούσα μεθοδολογία οι υπό ανάλυση γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε περιοχές και η σχεδίαση πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε μία από αυτές και όχι για όλο το μήκος της γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Αυτό κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμο για γραμμές τέτοιες όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετικά χαρακτηριστικά κατά μήκος τους.

97

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία ορίζονται κατάλληλοι δείκτες απόδοσης έτσι ώστε να συσχετισθούν το κόστος του επιπέδου μόνωσης της γραμμής και το κόστος της αντίστασης γείωσης πύργων με το κόστος των κεραυνικών σφαλμάτων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης, υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των δύο αυτών κατασκευαστικών παραμέτρων έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι καθορισμένοι δείκτες απόδοσης.

<u>5.4.1 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης</u>

Η υπό ανάλυση γραμμή μεταφοράς χωρίζεται σε N περιοχές λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και διαφορετικών τιμών αντίστασης γείωσης πύργων που επικρατούν σε κάθε μία από αυτές. Αναλύοντας την κάθε μία περιοχή ξεχωριστά, υπολογίζονται κατάλληλες τιμές για το επίπεδο μόνωσης της γραμμής και για την αντίσταση γείωσης των πύργων. Ο αριθμός των συνολικών κεραυνικών σφαλμάτων υπολογίζεται για κάθε μία περιοχή χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.14) της παραγράφου 3.4.3.

Ένας δείκτης απόδοσης ορίζεται για κάθε μία περιοχή της υπό εξέτασης γραμμής μεταφοράς, έτσι ώστε να συσχετιστεί το ετήσιο κόστος των συνολικών σφαλμάτων με το συνολικό κόστος επένδυσης των δύο κατασκευαστικών παραμέτρων (επίπεδο μόνωσης και αντίσταση γείωσης πύργων), για κάθε μία περιοχή.

$$J_{i} = k_{i}(N_{Ti}) + g_{Uai}(U_{ai}) + g_{Ri}(R_{i})$$
(5.15)

όπου:

i = 1 ... N είναι ο αριθμός των περιοχών,

 J_i είναι ο δείκτης απόδοσης κόστους για την i περιοχή,

 $k_i(\cdot)$ είναι το ετήσιο κόστος σφαλμάτων,

 $g_{ji}(\cdot)$ είναι η ισοδύναμη ετήσια επένδυση της *i* περιοχής της γραμμής για το κατασκευαστικό χαρακτηριστικό *j*,

 N_{Ti} είναι τα συνολικά σφάλματα της i περιοχής,

*U*_{αi} είναι το επίπεδο μόνωσης και

 R_i είναι η αντίσταση γείωσης πυλώνων της i περιοχής.

Το ετήσιο κόστος σφαλμάτων δίνεται από την εξίσωση [5]:

$$k(\cdot) = C_{MEU} + C_{RE} + C_{FC}$$
(5.16)

όπου:

 $C_{\rm MEU}$ είναι το ετήσιο μέσο κόστος της μη διανεμόμενης ενέργειας για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, το οποίο ισούται με μηδέν για μη ακτινικές γραμμές, $C_{\rm RE}$ είναι το μέσο κόστος για την επιδιόρθωση ενός μόνιμου σφάλματος και $C_{\rm FE}$ είναι το ισοδύναμο ετήσιο ανά γραμμή κοινωνικό κόστος (κόστος των καταναλωτών).

Η ισοδύναμη ετήσια επένδυση υπολογίζεται από το συνολικό κόστος επένδυσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$g(\cdot) = \left(\frac{r(r+1)^{t}}{(r+1)^{t}-1} + p\right)G(\cdot)$$
(5.17)

όπου:

G(·)είναι το συνολικό κόστος επένδυσης των κατασκευαστικών παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς,

r είναι το ετήσιο επιτόκιο,

t είναι η εκτιμώμενη περίοδος εκμετάλλευσης της γραμμής σε έτη και

p είναι ένας εμπειρικός συντελεστής ο οποίος ορίζει το λόγο του ετήσιου κόστους συντήρησης προς το συνολικό κόστος επένδυσης.

5.4.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Οι κατασκευαστικοί παράμετροι (επίπεδο μόνωσης και αντίσταση γείωσης πύργων), για κάθε μία περιοχή, συγκροτούν ένα διάνυσμα στήλης *x*:

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_{2N}\} = \{U_{a1}, U_{a2}, \dots, U_{aN}, R_1, R_2, \dots, R_N\}$$
(5.18)

Η βέλτιστη επιλογή των x_i τιμών ελαχιστοποιεί το σύνολο των N δεικτών απόδοσης που ορίζονται στην (5.15), δηλαδή:

$$\min_{Va_i, R_i} J_i = \min_{Va_i, R_i} [J_1 \quad J_2 \quad \dots \quad J_N]$$
(5.19)

σύμφωνα με τα λειτουργικά όρια:

$$U_{\alpha i} \min \le U_{\alpha i} \le U_{\alpha i} \max$$

 $R_i \min \le R_i \le R_i \max$

όπου:

 $U_{\alpha i}$ min, $U_{\alpha i}$ max, R_i min, R_i max είναι οι τιμές ορίων όπως ορίζονται από τις ηλεκτρικές εταιρίες.

Οι βέλτιστες τιμές x_i θα καθοριστούν από την εφαρμογή ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

5.4.3 Υποθέσεις

Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης, εφαρμόζεται έτσι ώστε να υπολογιστούν βέλτιστες τιμές τόσο για το επίπεδο μόνωσης των γραμμών, όσο και για την αντίσταση γείωσης πύργων της κάθε περιοχής. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους, δηλαδή:

- α) το μέσο ύψος των αγωγών προστασίας (H),
- β) την οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας (g),
- γ) την συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος (L),
- δ) το μήκος της γραμμής μεταφοράς (l),
- ε) την ισοδύναμη διάμετρο του αγωγού με (D) και χωρίς corona (d), και
- στ) το ύψος των αγωγών φάσης στον πύργο (h_c) ,

λαμβάνονται υπόψη οι τυπικές τιμές, που χρησιμοποιούνται από τις ηλεκτρικές εταιρίες.

5.4.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιηθεί το διάνυσμα της αντικειμενικής συνάρτησης πολλών μεταβλητών. Λόγω του ότι η αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι δευτέρου βαθμού, η γραμμική παλινδρόμηση δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και το ελάχιστο δεν μπορεί να επιτευχθεί απευθείας σε ένα στάδιο. Απαιτείται λοιπόν μία βηματική ανάλυση που ονομάζεται τεχνική επαναλήψεων. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που ικανοποιούν αυτή την απαίτηση όπως για παράδειγμα οι μέθοδοι κλίσης (π.χ. Newton-Raphson, Levenberg-Marquardt και quasi Newton [12, 13]) και οι άμεσοι μέθοδοι αναζήτησης (π.χ. Simplex of Nelder και Mead [14]).

Σύμφωνα με τις επαναληπτικές μεθόδους το διάνυσμα της βέλτιστης λύσης μπορεί να βρεθεί με την επανάληψη μιας εξίσωσης της μορφής:

$$X_{n+1} = X_n - \lambda_n \cdot col \ M_n \tag{5.20}$$

όπου:

 X_n είναι η τιμή του διανύσματος του κατασκευαστικού χαρακτηριστικού στην $n^{io\sigma \tau \eta}$ επανάληψη,

 λ_n είναι ένα διάνυσμα συντελεστών, το οποίο επιταχύνει τη σύγκλιση,

col M_n είναι ένα διάνυσμα στήλης που σχηματίζεται από τον Jacobian πίνακα M_n και M_n είναι ο Jacobian πίνακας, που ορίζεται ως:

$$M_{n}(x_{1}, x_{2}, ..., x_{2N}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{1}}{\partial x_{1}} & \cdots & \frac{\partial J_{1}}{\partial x_{2N}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial J_{N}}{\partial x_{1}} & \cdots & \frac{\partial J_{N}}{\partial x_{2N}} \end{bmatrix}$$
(5.21)

Η μέθοδος υπολογίζει την πρώτη μερική παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις εξαρτημένες μεταβλητές [14]. Αυτό πραγματοποιείται εσωτερικά, κάνοντας μία κατάλληλη προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι ένα συγκεκριμένο βαθμό.

Στην συνέχεια εφαρμόζεται ο ακόλουθος αλγόριθμος που βασίζεται σε μία μέθοδο quasi Newton.

Βήμα 1: Καθορισμός της συνάρτησης *J_i* σε σχέση με τα μετεωρολογικά και τα κατασκευαστικά στοιχεία του πύργου, από τη σχέση (5.15).

Βήμα 2: Ορισμός αρχικών τιμών για το επίπεδο μόνωσης U_a και την αντίσταση γείωσης πύργου R.

Βήμα 3: Υπολογισμός των N_{Ti} από την (3.14), J_i από την (5.15), M_n από την (5.21) και X_{n+1} από την (5.20).

Βήμα 4: Όσο το $||x_{n+1} - x_n|| < \varepsilon$, ακολουθείτε επανάληψη του τρίτου βήματος, όπου το ε είναι μία θετική παράμετρος, η οποία ορίζει την επιθυμητή ακρίβεια σύγκλισης.

Βήμα 5: Παρουσίαση των τιμών σύγκλισης *X_n*.

<u>5.5 Συμπεράσματα</u>

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού δόθηκε εν συντομία μία ανασκόπηση των υπαρχόντων μεθόδων σχεδίασης γραμμών μεταφοράς και στοιχεία σχετικά με τη θεωρία βελτιστοποίησης, αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία για τη βέλτιστη σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης λαμβάνοντας υπόψη της τόσο τα σφάλματα απευθείας κεραυνοπληξίας όσο και αυτά που οφείλονται στο φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία σχετίζοντας το κόστος των κατασκευαστικών παραμέτρων των γραμμών (επίπεδο μόνωσης και αντίσταση γείωσης πύργων), με το κόστος των κεραυνικών σφαλμάτων, υπολογίζει εκείνες τις βέλτιστες τιμές των δύο κατασκευαστικών παραμέτρων που πρέπει να

χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των γραμμών μεταφοράς, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κεραυνικά σφάλματα.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εξετάζει την γραμμή μεταφοράς σε περιοχές και διεξάγει την σχεδίαση σε κάθε μία από αυτές ξεχωριστά, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για γραμμές τέτοιες όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές παρουσιάζοντας σημαντικά διαφορετικά χαρακτηριστικά κατά μήκος τους. Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να αποδειχθεί ένα χρήσιμο εργαλείο στις μελέτες σχεδιαστών ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος, αποσκοπώντας στη μείωση των σφαλμάτων που προκαλούνται από κεραυνό.

<u>5.6 Βιβλιογραφία</u>

- [1]W.S. Chang, C.D. Zinn, "Minimization of the cost of an electrical transmission line system", IEEE Trans on PAS, vol. 95, no. 4, pp. 1091-1098, 1976.
- [2]I.S. Grant, R.E. Clayton, "Transmission line optimization", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 2, no. 2, pp. 520-526, 1987.
- [3]R.E. Kennon, D.A. Douglass, "EHV transmission line design opportunities for cost reduction", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 1145-1152, 1990.
- [4]M.M. Saied, M. Jaboori, D. El-Nakid, "On the optimal design of high voltage overhead transmission lines", Journal of Electric Machines & Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 293-312, 1990.
- [5]N.A. Katic, M.S. Savic, "Technical and economical optimization of overhead power distribution line lightning protection", IEE Proc.-Gen. Tran. Distr., vol. 145, no. 3, pp. 239-244, 1998.
- [6]M.M. Saied, "An alternative procedure for the design of high voltage overhead transmission lines", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, Louisiana, pp. 708-714, 1999.
- [7]R. Holt, T.T. Nguyen, "Determination of optimal shielding angles in shielded transmission line design", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 4, pp. 2892-2897, 2000.
- [8]T.T. Nguyen, R. Holt, "Lightning protection of transmission lines: optimal shielding design procedure", IEE Proc.-Gen. Trans. Distr., vol. 150, no. 6, pp. 659-667, 2003.
- [9]Α.Γ. Μπακιρτζής, "Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 1998.
- [10] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 104, no. 4, pp. 919-927, 1985.
- [11]L. Ekonomou, D.P. Iracleous, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "An optimal design method for improving the lightning performance of overhead high voltage transmission lines", Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 76, no. 6-7, pp. 493-499, 2006.

- [12] G.F. Forsythe, M.A. Malcolm, C.B. Moler, "Computer methods for mathematical computations", Prentice Hall, 1976.
- [13] P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright, "Numerical linear algebra and optimization", Addison Wesley, 1991.
- [14] D.F. Shanno, "Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization", Mathematics of computing, vol. 24, pp. 647-656, 1970.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή των Προτεινόμενων Μεθοδολογιών σε Ελληνικές Γραμμές Μεταφοράς Υψηλής Τάσης

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, σε ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Έτσι αφού παρουσιαστούν οι υπό ανάλυση γραμμές και δοθούν τα στοιχεία και χαρακτηριστικά τους, εκτιμάται η κεραυνική συμπεριφορά τους τόσο με τη χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο, όσο και με τη χρήση της μεθοδολογίας τεχνητών νευρωνικών δικτύων που παρουσιάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών τόσο μεταξύ τους, όσο και με πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα κεραυνικών σφαλμάτων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού Α.Ε (ΔΕΗ Α.Ε.), όπως επίσης και με τα αποτελέσματα άλλης μεθοδολογίας από τη διεθνή βιβλιογραφία κάνοντας εμφανή την ακρίβεια που οι προτεινόμενες μεθοδολογίες προσφέρουν. Τέλος εφαρμόζεται, στις υπό ανάλυση γραμμές, η μέθοδος που παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, για τη σχεδίαση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, προτείνοντας για αυτές, εκείνα τα κατασκευαστικά στοιχεία που η χρησιμοποίησή τους θα ελαχιστοποιούσε σημαντικά τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνό.

6.2 Ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης

Το δίκτυο γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που είναι εγκατεστημένο και σε εκμετάλλευση στον ελλαδικό ηπειρωτικό χώρο περιλαμβάνει γραμμές μεταφοράς των 150 kV και 400 kV (σχήμα 6.1). Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 330 γραμμές μεταφοράς των 150 kV, συνολικού μήκους περίπου 7540 km και 43 γραμμές των 400 kV, συνολικού μήκους περίπου 2230 km.

Στα πλαίσια της διδακτορικής αυτής διατριβής επιλέχθηκαν δεκαπέντε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, τρεις των 400 kV και δώδεκα των 150 kV, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή σε αυτές των προτεινόμενων μεθοδολογιών των παραγράφων 3.4, 4.4 και 5.4. Οι γραμμές αυτές μαζί με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους τα οποία διατέθηκαν από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1], παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1. Οι δεκαπέντε αυτές γραμμές επιλέχθηκαν πολύ προσεχτικά σε σχέση με τις άλλες γραμμές του ελληνικού δικτύου, βάση των ακόλουθων χαρακτηριστικών:

 α) του υψηλού αριθμού κεραυνικών σφαλμάτων που παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια καταιγίδων,

β) την ομοιόμορφη κατασκευή τους για τουλάχιστον 90% του μήκους τους,

γ) του ικανοποιητικού μήκους τους και του ικανοποιητικού χρόνου λειτουργίας τους
 έτσι ώστε να παρουσιάζουν μία εύλογη έκθεση σε κεραυνούς και

δ) των σημαντικών διαφορετικών χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα της κεραυνικής στάθμης και της αντίστασης γείωσης πύργων, που υπάρχουν κατά μήκος των γραμμών.





α/α	Γραμμή	Τάση (kV)	Μήκος (km)	Αριθμός πύργων	Επίπεδο μόνωσης (kV)	Διαστάσεις Αγωγού (ACSR MCM)	Αριθμός κυκλ/των
1	Αθήνα - Αχελώος	400	250.557	717	1550	954	2
2	Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	400	90.589	249	1550	954	2
3	Θεσσαλονίκη - Καρδιά	400	109.908	305	1550	954	2
4	Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	150	183.101	516	750	636	2
5	Άργος ΙΙ - Άστρος	150	29.427	85	750	636 & 336,4	2 & 1
6	Βόλος ΙΙ - Λαύκος	150	35.206	90	750	336,4	1
7	Γιάννενα - Καλπάκι	150	27.850	86	750	336,4	1
8	Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	150	69.665	179	750	336,4	1
9	Αχελώος - Άραχθος	150	70.300	192	750	636	2
10	Ταυρωπός - Λαμία	150	75.384	219	750	636	2
11	Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	150	17.485	44	750	336,4	1
12	Κιλκίς - Σέρρες	150	58.068	162	750	336,4	1
13	Άραχθος - Ηγουμενίτσα	150	75.802	239	750	336,4	1
14	Μεγαλόπολη - Σπάρτη	150	64.472	173	750	336,4	1
15	Άκτιο - Αργοστόλι	150	81.409	224	750	336,4	1

Πίνακας 6.1: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η πλειονότητα των ελληνικών γραμμών μεταφοράς παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετικά χαρακτηριστικά (όπως είναι η κεραυνική στάθμη και η αντίσταση γείωσης πύργων) κατά μήκος τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ελληνικές γραμμές λόγω της γεωγραφικής ιδιομορφίας της Ελλάδος, διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές.

Έτσι η σχεδίαση μιας νέας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης από ένα μελετητή (ιδιαίτερα αν η γραμμή αυτή θα κατασκευαστεί στον ελλαδικό χώρο), θα πρέπει να γίνει με περίσσια προσοχή λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών από τις οποίες αυτή θα διέλθει. Η αντιμετώπιση αυτή των γραμμών ανά περιοχές και όχι για το σύνολο του μήκους των, αποσκοπεί στην καλύτερη εκτίμηση

της κεραυνικής τους συμπεριφοράς, στην προστασίας αυτών από κεραυνικά πλήγματα και συνεπώς στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων σε αυτές.

Κάθε μία από τις παραπάνω γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (που στη συνέχεια θα αναφέρονται ως «οι υπό ανάλυση γραμμές») μπορεί να διαχωριστεί σε περιοχές λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών και των διαφορετικών μέσων τιμών αντίστασης γείωσης πύργων που παρουσιάζονται κατά μήκος αυτών. Ο διαχωρισμός των γραμμών σε περιοχές που πραγματοποιήθηκε από τον συγγραφέα στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 6.2.

Στον ίδιο πίνακα καθώς επίσης και στο σχήμα 6.2 που παρατίθεται στη συνέχεια, δίδονται οι τιμές της μέσης κεραυνικής στάθμης για τα έτη 1999-2004 και της καταγεγραμμένης κατά την κατασκευή αντίστασης γείωσης πύργων για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά, κάνοντας έτσι εμφανή τις σημαντικές διαφορές που παρατηρούνται στα στοιχεία αυτά από περιοχή σε περιοχή. Οι τιμές αυτές έχουν διατεθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1] και την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [2].

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπό ανάλυση γραμμές: Γιάννενα - Καλπάκι, Βόλος Η - Λαύκος, Μεγαλόπολη - Σπάρτη, Άκτιο - Αργοστόλι και Άργος Η - Άστρος επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών με βάση ένα επιπλέον χαρακτηριστικό. Είναι όλες τους γραμμές ακτινικές, με αποτέλεσμα η ύπαρξη ενός μόνιμου σφάλματος στις γραμμές αυτές να συνεπάγεται τη μη τροφοδότηση καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια, με όλα τα δυσάρεστα αποτελέσματα που αυτό μπορεί να επιφέρει. Έτσι τόσο ο υπολογισμός της κεραυνικής συμπεριφοράς τους, όσο και η κατάλληλη σχεδίασή τους, που θα έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών τους σφαλμάτων, κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικά και αναδεικνύουν τη μεγάλη χρησιμότητα των προτεινόμενων μεθοδολογιών.

				R	Т
α/α	Γραμμή	Περιοχή	Πύργοι	Κ (Καταγεγραμμένη κατά την κατασκευή σε Ω)	- (Μέση κεραυνική στάθμη 1999-2004)
1	Αθήνα - Αχελώος	Ι	1 - 130	28,9	17,8
		II	131 - 318	6,5	21,9
		III	319 - 578	26,8	33,5
		IV	579 - 717	5,4	37,6
2	Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	Ι	1 - 209	6,0	31,2
		II	210 - 249	11,6	28,5
3	Θεσσαλονίκη - Καρδιά	Ι	1 - 195	1,9	31,2
		II	196 - 260	8,8	28,4
		III	261 - 305	18,2	27,6
4	Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	1 - 89	30,2	17,8
		II	90 - 155	18,5	21,9
		III	156 - 200	31,7	23,5
		IV	201 - 510	4,7	25,0
		V	511 - 517	49,0	28,0
5	Άργος ΙΙ - Άστρος	Ι	1 - 23	4,2	26,3
		II	24 - 61	8,1	21,8
		III	62 - 85	60,4	18,3
6	Βόλος ΙΙ - Λαύκος	Ι	1 - 17	9,8	17,0
		II	18 - 40	5,1	23,5
		III	41 - 90	10,4	33,6
7	Γιάννενα - Καλπάκι	Ι	1 - 40	4,2	40,1
		II	41 - 86	25,8	33,0
8	Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	1 - 66	6,2	29,4
		II	67 - 124	10,8	23,6
		III	125 - 179	14,5	28,0
9	Αχελώος - Άραχθος	Ι	1 - 70	3,0	37,6
		II	71 - 130	3,1	30,4
		III	131 - 192	3,6	37,3
10	Ταυρωπός - Λαμία	Ι	1 - 89	11,4	38,3
		II	90 - 168	24,9	29,5
		III	169 - 219	7,3	19,7
11	Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	Ι	1 - 29	57,5	39,4
		II	30 - 44	14,9	25,1
12	Κιλκίς - Σέρρες	Ι	1 - 46	2,0	29,4
	5 11 5	II	47 - 106	4,4	28,3
		III	107 - 162	1,8	27,2
13	Άραχθος - Ηγουμενίτσα	Ι	1 - 80	5,2	37,3
		II	81 - 163	13,0	38,4
		III	164 - 239	45,4	39,4
14	Μεγαλόπολη - Σπάρτη	Ι	1 - 45	5.1	28.0
	, (<u></u> h(II	46 - 75	39.7	29.7
		III	76 - 173	11.2	32.4
15	Άκτιο - Αονοστόλι	I	1 - 55	4.8	38.5
-	F / 201011	II	56 - 137	64.9	35.4
		III	138 - 224	126.3	31.2

Πίνακας 6.2: Στοιχεία των υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης [1, 2]



Σχήμα 6.2: Τα στοιχεία των υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης [1, 2].

6.3 Εφαρμογή μεθοδολογίας υπολογισμού κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση αναλυτικών μεθόδων

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.4 και κωδικοποιήθηκε στο υπολογιστικό πακέτο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.5, εφαρμόστηκε στις δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με στόχο τον υπολογισμό των κεραυνικών τους σφαλμάτων. Η ανάλυση και ο υπολογισμός των κεραυνικών σφαλμάτων πραγματοποιείται για κάθε μία γραμμή και έτος ξεχωριστά. Τα έτη τα οποία εξετάζονται είναι τα 2003 και 2004.

Αρχικά εισάγονται εκείνα τα στοιχεία και χαρακτηριστικά της γραμμής που θεωρούνται στην ανάλυση σταθερά για όλο το μήκος της γραμμής. Τέτοια στοιχεία αποτελούν το μέσο ύψος των αγωγών προστασίας, η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας και το μέσο ύψος των αγωγών φάσης στον πύργο, οι τιμές των οποίων δίδονται στο σχήμα 2.4 της παραγράφου 2.4.1. Άλλα στοιχεία όπως το μήκος της γραμμής μεταφοράς, το επίπεδο μόνωσης και οι διαστάσεις των αγωγών δίδονται στον πίνακα 6.1. Επιπλέον, στοιχεία όπως η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού με και χωρίς corona και η συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος (αυτεπαγωγή πύργου και συστήματος γείωσης) της γραμμής που αναλύεται, αποτελούν τιμές σταθερές για όλο το μήκος της γραμμής και ίσες με 20 mm, 24,8 mm και 5,4 μΗ αντίστοιχα.

Στη συνέχεια αφού οριστούν οι περιοχές στις οποίες χωρίζεται η γραμμή μεταφοράς (βλέπε πίνακα 6.2), εισάγεται η κεραυνική στάθμη της κάθε περιοχής για κάθε ένα μήνα του έτους. Τα στοιχεία αυτά έχουν διατεθεί από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [2]. Έπειτα η μεθοδολογία απαιτεί την εισαγωγή είτε της μέσης καταγεγραμμένης κατά την κατασκευή αντίστασης γείωσης πύργων της κάθε περιοχής (περίπτωση Ι), είτε τις παραμέτρους της ειδικής αντίστασης του εδάφους για κάθε μία περιοχή της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς (περίπτωση ΙΙ). Η καταγεγραμμένη τιμή της αντίσταση γείωσης πύργων για κάθε περιοχή δίδεται στον πίνακα 6.2, ενώ οι παράμετροι της ειδικής αντίστασης του εδάφους για κάθε μία περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μέθοδο γενετικού αλγορίθμου [3] και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Στην παρούσα εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, για τον υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων των δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμών, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μηνιαίων τιμών αντίστασης γείωσης πύργων της κάθε περιοχής, οι παράμετροι της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων γείωσης. Έτσι σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.2 εκτιμήθηκαν οι μηνιαίες τιμές των αντιστάσεων γείωσης των πύργων της κάθε περιοχής των υπό ανάλυση γραμμών, γρησιμοποιήθηκαν για τη ετη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.2 εκτιμήθηκαν οι μηνιαίες τιμές των αντιστάσεων γείωσης των πύργων της κάθε περιοχής των υπό ανάλυση γραμμών για τα έτη 2003 και 2004, οι οποίες και χρησιμοποιούνται περαιτέρω στους υπολογισμούς. Στα σχήματα 6.3.1 έως 6.3.3 παρουσιάζονται μερικές από τις εκτιμώμενες μηνιαίες τιμές αντιστάσεων γείωσης πύργων, κάνοντας εμφανή τη μεταβολή τους κατά τη διάρκεια του έτους.

Στη συνέχεια προσομοιώνονται οι κεραυνικές εκκενώσεις. Δύο είναι οι κεραυνικές παράμετροι στις οποίες εστιάζεται το ενδιαφέρον της παρούσας μεθοδολογίας. Η κλίση μετώπου (di/dt) και η μέγιστη τιμή (I_{peak}) του κεραυνικού ρεύματος, οι οποίες και επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από τις πιθανοτικές κατανομές των K. Berger, R.B. Anderson και H. Kröninger [4]. Οι παράμετροι αυτοί ακολουθούν την λογαριθμική κανονική κατανομή, ενώ σύγκλιση της προσομοίωση παρατηρείται στις 10.000 επαναλήψεις αν και ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί 100.000 επαναλήψεις.



Σχήμα 6.3.1: Μηνιαίες εκτιμώμενες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς Θεσσαλονίκη-Καρδιά.



Σχήμα 6.3.2: Μηνιαίες εκτιμώμενες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς Πύργος-Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.3.3: Μηνιαίες εκτιμώμενες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων της υπό ανάλυση γραμμής μεταφοράς Άραχθος-Ηγουμενίτσα.

Τέλος τα σφάλματα λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας και ανάστροφης διάσπασης καθώς επίσης και τα συνολικά κεραυνικά σφάλματα για κάθε μία περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών υπολογίζονται σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στις παραγράφους 3.4.1 έως 3.4.3 και τις εξισώσεις (3.9-3.14). Τα ετήσια αποτελέσματα που προέκυψαν για τα έτη 2003 και 2004 και για κάθε μία από τις δεκαπέντε γραμμές παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3. Στον ίδιο πίνακα

παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιώντας όμως αντί μηνιαίες τιμές, μία μέση ετήσια τιμή κεραυνικής στάθμης και τη μέση καταγεγραμμένη τιμή αντίστασης γείωσης πύργων για κάθε μία περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών. Διεξάγεται δηλαδή σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση για όλο το μήκος της γραμμής αντιμετωπίζοντάς την με ενιαίο τρόπο. Τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3, χρησιμοποιώντας τόσο μηνιαίες τιμές (απεικονίζονται με μπλε χρώμα και ονομάζονται "Monthly") όσο και ετήσιες τιμές (απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και ονομάζονται "Yearly") κατασκευαστικών στοιχείων, παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα 6.4.1 έως 6.4.15, όπου και συγκρίνονται με τον καταγεγραμμένο αριθμό σφαλμάτων των υπό ανάλυση γραμμών (απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και ονομάζονται "Real"), ο οποίος έχει διατεθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1], κάνοντας έτσι εμφανή την ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

		Ετήσια	τήσια εκτιμώμενα κεραυνικά σφάλματα		
Γραμμή	Περιοχή	20	03	20	04
		$(\mathbf{R},\mathbf{T})_{M\eta v \iota a \iota a}$	(R , T) _{Ετήσια}	(R, T) _{Μηνιαία}	(R , T) _{Ετήσια}
Αθήνα - Αχελώος	Ι	1,249	1,138	0,693	0,688
	II	0,720	0,608	0,551	0,512
	III	2,837	2,713	2,013	1,976
	IV	1,091	0,976	0,758	0,744
	Σύνολο:	5,897	5,434	4,015	3,920
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	Ι	2,211	2,138	1,745	1,676
	II	1,743	1,340	1,149	0,941
	Σύνολο:	3,954	3,478	2,894	2,617
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	Ι	2,408	2,319	0,695	0,510
	II	1,853	2,103	0,928	1,016
	III	3,417	3,531	1,812	1,789
	Σύνολο:	7,678	7,953	3,435	3,215
Άργος ΙΙ - Άστρος	Ι	0,181	0,213	0,000	0,000
	II	0,322	0,403	0,000	0,000
	III	0,476	0,693	0,000	0,371
	Σύνολο:	0,979	1,309	0,000	0,371
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	Ι	0,000	0,000	0,103	0,212
	II	0,000	0,011	0,576	0,760
	III	0,054	0,061	0,922	1,134
	Σύνολο:	0,054	0,072	1,601	2,106

Πίνακας 6.3: Ετήσια αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

		Ετήσια	εκτιμώμενα	κεραυνικά σφ	οάλματα
Γραμμή	Περιοχή	2003		2004	
		$(\mathbf{R},\mathbf{T})_{M\eta v \iota a \iota a}$	$(\mathbf{R},\mathbf{T})_{\mathrm{Ethsum}}$	$(\mathbf{R},\mathbf{T})_{M\eta v \iota a \iota a}$	$(\mathbf{R},\mathbf{T})_{\mathrm{Ethsure}}$
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	0,537	1,212	0,074	0,246
	II	1,726	2,365	1,241	1,456
	III	0,856	1,201	0,449	0,624
	IV	2,967	3,633	1,656	1,857
	V	0,245	0,389	0,000	0,184
	Σύνολο:	6,331	8,800	3,420	4,367
Γιάννενα - Καλπάκι	Ι	0,534	0,772	0,000	0,000
	II	1,311	1,658	0,498	0,829
	Σύνολο:	1,845	2,430	0,498	0,829
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	1,064	1,071	0,644	0.552
	II	1,731	1,808	0,610	0,572
	III	2,423	2,494	0,662	0,619
	Σύνολο:	5,218	5,373	1,916	1,743
Αχελώος - Άραχθος	Ι	1,473	1,292	1,940	2,477
	II	1,872	2,715	2,338	2,945
	III	1,284	1,102	2,239	2,715
	Σύνολο:	4,629	4,109	6,517	8,137
Ταυρωπός - Λαμία	Ι	0,763	1,043	0,322	0,405
	II	1.843	2.651	0.558	0.622
	III	1,330	1,580	0,401	0,576
	Σύνολο:	3,936	5,274	1,281	1,603
Ηνουμενίτσα - Σανιάδα	I	0.711	0.934	1.722	1.964
	П	0.383	0.491	0.534	0.728
	Σύνολο:	1.094	1.425	2,256	2.692
Κιλκίς - Σέρρες	I	0 359	0,509	1 343	1 433
	I	0 984	1 124	1 932	2 167
	III	0.128	0 241	0.854	0.929
	Σύνολο:	1.471	1.874	4,129	4.529
Άραχθος - Ηγουμενίτ ο α	I	1 792	1 945	0.742	0.850
πραχους προφανισα	II	1,792	2 394	1 273	1 871
	III	4 287	5 432	2 749	2 131
	Σύνολο·	7,926	9.771	5,164	4.852
Μεναλόπολη - Σπάοτη	I	0.000	0,000	0 181	0.076
	П	0,000	0,000	0,527	0 4245
	Ш	0.014	0,000	1 064	1 057
	Σύνολο·	0.014	0.000	1.772	1,558
Άκτιο - Αργοστόλι		0 000	0.000	0.231	0 356
21Ktw - 210700 toki	I	2 417	2 302	2 582	0,550 2 741
		2,717	2,502	2,302	5 108
		5,007	2,052 1 021	6 5 3 5	9,190 9 205



Σχήμα 6.4.1: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Αθήνα-Αχελώος.



Σχήμα 6.4.2: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Θεσσαλονίκη-Αμύνταιο.



Σχήμα 6.4.3: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Θεσσαλονίκη-Καρδιά.



Σχήμα 6.4.4: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Κουμουνδούρου-Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.4.5: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άργος ΙΙ-Άστρος.



Σχήμα 6.4.6: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Βόλος ΙΙ-Λαύκος.



Σχήμα 6.4.7: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Γιάννενα-Καλπάκι.



Σχήμα 6.4.8: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Πύργος-Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.4.9: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Αχελώος-Άραχθος.



Σγήμα 6.4.10: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Ταυρωπός-Λαμία.



Σχήμα 6.4.11: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Ηγουμενίτσα-Σαγιάδα.



Σγήμα 6.4.12: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Κιλκίς-Σέρρες.



Σχήμα 6.4.13: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άραχθος-Ηγουμενίτσα.



Σχήμα 6.4.14: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Μεγαλόπολη-Σπάρτη.



Σχήμα 6.4.15: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άκτιο-Αργοστόλι.

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζεται το ποσοστό διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων με τη χρήση μηνιαίων και ετήσιων τιμών. Από τον πίνακα αυτόν γίνεται εμφανές ότι η μεταβολή της αντίστασης γείωσης πύργων κατά τη διάρκεια του έτους και η χρήση των μηνιαίων τιμών της κεραυνικής στάθμης επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα σε ποσοστό 1% με 67%, σε σχέση με τις αντίστοιχες ετήσιες τιμές των στοιχείων αυτών, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας και το πλεονέκτημά της σε σύγκριση με άλλες που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων (31%-67%) παρουσιάζονται στις ακτινικές γραμμές, οι οποίες αφενός μεν έχουν περιορισμένο μήκος σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό ανάλυση γραμμές, αφετέρου ο αριθμός των εκτιμώμενων σφαλμάτων είναι ιδιαίτερα μικρός (τείνει στο μηδέν) και ίσως μη απόλυτα ακριβής, έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα τις μεγάλες διαφοροποιήσεις στα εκτιμώμενα σφάλματα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία που εξετάζει τη γραμμή σε περιοχές, κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη για γραμμές όμοιες με τις ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, οι οποίες διέρχονται συγχρόνως από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές εμφανίζοντας κατά μήκος τους διαφορετικά χαρακτηριστικά.

	Ποσοστιαία διαφορά ετήσιων			
ι ραμμη	<u>κεραυνικων</u> 2003	<u>σφαλματων</u> 2004		
Αθήνα - Αχελώος	7,85 %	2,37 %		
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	12,04 %	9,57 %		
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	3,58 %	6,40 %		
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	39,00 %	27,69 %		
Άργος ΙΙ - Άστρος	33,71 %			
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	33,33 %	31,54 %		
Γιάννενα - Καλπάκι	31,71 %	66,47 %		
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	2,97 %	9,03 %		
Αχελώος - Άραχθος	11,23 %	24,86 %		
Ταυρωπός - Λαμία	33,99 %	25,14 %		
Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	30,26 %	19,33 %		
Κιλκίς - Σέρρες	27,40 %	9,69 %		
Άραχθος - Ηγουμενίτσα	23,28 %	6,04 %		
Μεγαλόπολη - Σπάρτη		12,08 %		
Άκτιο - Αργοστόλι	10,36 %	26,93 %		

Πίνακας 6.4: Ποσοστιαία διαφορά κεραυνικών σφαλμάτων με τη χρήση μηνιαίων και ετήσιων τιμών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών.

6.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας υπολογισμού κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να «μαθαίνουν» αυτόματα προσεγγιστικές σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων, χωρίς να υποτάσσονται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Στην παρούσα μελέτη κατασκευάστηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας για την κατασκευή του τα στοιχεία των δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης της παραγράφου 6.2, το οποίο και είναι ικανό να εκτιμά τα κεραυνικά σφάλματα όχι μόνο των δεκαπέντε αυτών γραμμών αλλά και οποιασδήποτε άλλης γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης του ελληνικού συστήματος. Ως προς τη δημιουργία και την εκπαίδευση του προτεινόμενου δικτύου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB [5] και συγκεκριμένα η εργαλειοθήκη Νευρωνικών Δικτύων. Για να καταλήξουμε όμως στο προτεινόμενο σε αυτή τη διδακτορική διατριβή μοντέλο, προηγήθηκε διεξοδική εξέταση και μελέτη πολλών μοντέλων δύο διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων, επιλέγοντας το μοντέλο εκείνο που παρουσίασε την καλύτερη ικανότητα γενίκευσης, είχε συμπαγή μορφή, γρήγορη διαδικασία εκπαίδευσης και χαμηλή κατανάλωση υπολογιστικής μνήμης.

Πιο αναλυτικά, έχοντας αποφασίσει τον αριθμό των εισόδων και εξόδων του δικτύου (βλέπε παράγραφο 4.4), στη συνέχεια έπρεπε να αποφασιστεί το είδος του νευρωνικού δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί. Εξετάστηκαν μοντέλα δύο διαφορετικών ειδών. Του πολυστρωματικού δικτύου perceptron (MLP) και του δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF) με σκοπό την εύρεση εκείνου του μοντέλου που θα παρουσίαζε την καλύτερη γενίκευση.

Χρησιμοποιώντας το δίκτυο MLP, το επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός του αριθμού των κρυμμένων στρωμάτων, του αριθμού των νευρώνων σε κάθε στρώμα, της μεθόδου εκπαίδευσης και της συνάρτησης μεταφοράς. Έχοντας υπόψη ότι ένα κρυμμένο στρώμα είναι επαρκές για γραμμικά διαχωρίσιμα δεδομένα εισόδου, ενώ περισσότερα κρυμμένα στρώματα χρησιμοποιούνται για μη γραμμικά διαχωρίσιμα δεδομένα [6], στην παρούσα εργασία, δοκιμάστηκαν μοντέλα νευρωνικών δικτύων με μέχρι και δύο κρυμμένα στρώματα. Όσο αφορά τις μεθόδους εκπαίδευσης και τις συναρτήσεις μεταφοράς που δοκιμάστηκαν στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5 και επιλέχθηκαν από το σύνολο των έτοιμων μεθόδων και συναρτήσεων της εργαλειοθήκης Νευρωνικών Δικτύων του ΜΑΤLAB.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πολλές διαδοχικές δοκιμές νευρωνικών μοντέλων τα οποία και αποτελούσαν συνδυασμούς ενός ή δύο κρυμμένων στρωμάτων (με εσωτερική μεταβολή στον αριθμό των νευρώνων (από 3 έως 20) προκειμένου να βρεθεί για πόσους νευρώνες παρουσιαζόταν ελάχιστο σφάλμα), των δύο μεθόδων εκπαίδευσης και των τριών συναρτήσεων μεταφοράς του πίνακα 6.5. Ο αριθμός των εποχών (επαναλήψεων), ο οποίος και αναπαριστά ένα σύνολο διανυσμάτων εκπαίδευσης του δικτύου για τον υπολογισμό νέων βαρών και όρων πόλωσης, διατηρούταν σταθερός και ίσος με 8000.

Μέθοδος Εκπαίδευσης	Συνάρτηση Μεταφοράς
- Gradient Descent	- Hyperbolic Tangent Sigmoid
- Levenberg - Marquardt	- Logarithmic Sigmoid
	- Hard-Limit

<u>Πίνακας 6.5:</u> Μέθοδοι εκπαίδευσης και συναρτήσεις μεταφοράς των κατασκευασμένων μοντέλων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων και για κάθε μία από τις πέντε εισόδους και μία έξοδο του δικτύου ήταν δύο χιλιάδες εκατόν εξήντα και αφορούν κάθε μία περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών (σαράντα πέντε περιοχές), για κάθε ένα ξεχωριστό μήνα μιας περιόδου τεσσάρων ετών (1999-2002). Από τα δεδομένα αυτά, το 80% των δεδομένων (δηλαδή χίλια εφτακόσια είκοσι οχτώ δεδομένα) χρησιμοποιήθηκαν στην εκπαιδευτική διαδικασία ενώ το υπόλοιπο 20% (δηλαδή τετρακόσια τριάντα δύο δεδομένα) χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του δικτύου. Σε κάθε επανάληψη 10% των δεδομένων εκπαίδευσης (δηλαδή εκατόν εβδομήντα δεδομένα) απομακρύνονταν τυχαία από το εκπαιδευτικό σύνολο υπολογίζοντας το σφάλμα επικύρωσης. Η εκπαιδευτική διαδικασία επαναλαμβανόταν εωσότου το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στα πραγματικά και επιθυμητά δεδομένα εξόδου φτάσει το 1% ή εωσότου ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει οριστεί (8000 στην παρούσα εφαρμογή).

Χρησιμοποιώντας το δίκτυο RBF εξορισμού το κρυμμένο στρώμα είναι ένα. Ο κάθε νευρώνας του κρυμμένου στρώματος αντιστοιχεί σε μία συνάρτηση βάσης που έχει τη μορφή συνάρτησης Gauss. Η εκπαίδευση του δικτύου RBF γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ πραγματικών και επιθυμητών εξόδων του δικτύου. Τα δεδομένα των πέντε εισόδων και μίας εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και αυτού του μοντέλου αφορούν την κάθε μία περιοχή των δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμών, για κάθε ένα ξεχωριστό μήνα μιας περιόδου τεσσάρων ετών (1999-2002).

Από όλα τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν (πραγματοποιώντας τις διαδικασίες εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου), επιλέχθηκε το μοντέλο με τα ακόλουθα

χαρακτηριστικά: πολυστρωματικό δίκτυο perceptron (MLP), ένα κρυμμένο στρώμα αποτελούμενο από δεκαεπτά νευρώνες, μέθοδος εκπαίδευσης η Levenberg -Marquardt και συνάρτηση μεταφοράς η Hyperbolic Tangent Sigmoid, ως το κατεξοχήν κατάλληλο και ακριβέστερο για την εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων μιας γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης. Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε σε σύγκριση με τα άλλα που δοκιμάστηκαν λόγω της καλύτερης ικανότητας γενίκευσής του, τη συμπαγή μορφή του, τη γρήγορη διαδικασία εκπαίδευσής του και την κατανάλωση μικρής υπολογιστικής μνήμης.

Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε γραμμή των 150 kV ή 400 kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, μιας και οι γραμμές αυτές παρουσιάζουν ανάλογα χαρακτηριστικά με τις γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπαιδευτική διαδικασία. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που ζητηθεί η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης άλλου συστήματος πέρα του ελληνικού, τότε απαιτείτε η επανεκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και η κατασκευή νέου μοντέλου το οποίο θα λάβει υπόψη του τα επιμέρους χαρακτηριστικά του νέου συστήματος.

Το παρόν μοντέλο εφαρμόζεται στις δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμές της παραγράφου 6.2 για τον υπολογισμό των κεραυνικών σφαλμάτων των ετών 2003 και 2004. Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα ετήσια εκτιμώμενα κεραυνικά σφάλματα για κάθε μία περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών. Το πλεονέκτημα της παρούσας μεθοδολογίας είναι η μη χρησιμοποίηση στους υπολογισμούς της εμπειρικών ή προσεγγιστικών εξισώσεων και σταθερών, όπως επίσης και δεδομένων ή μεταβλητών που δύσκολα μπορούν να μελετηθούν ή να μοντελοποιηθούν (π.χ. κεραυνός). Αντίθετα η μεθοδολογία χρησιμοποιεί μόνο πραγματικά στοιχεία των υπό εξέταση γραμμών που αναμφίβολα συμβάλλουν σημαντικά στην κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς, έχοντας ως αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και την ευκολότερη και άμεση εφαρμογή της. Τέλος στα σχήματα 6.5.1 έως 6.5.15 συγκρίνονται τα εκτιμώμενα με τη χρήση ΤΝΔ σφάλματα (απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και ονομάζονται "ANN"), με τον καταγεγραμμένο αριθμό σφαλμάτων των υπό ανάλυση γραμμών τιμές (απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και ονομάζονται "Real") που έχει διατεθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1], κάνοντας έτσι εμφανή τη μεγάλη ακρίβεια που η προτεινόμενη μεθοδολογία προσφέρει.

		Ετήσια ει	κτιμώμενα
Γραμμή	Περιοχή	κεραυνικά	α σφάλματα
		2003	2004
Αθήνα - Αχελώος	Ι	1,028	0,507
	II	0,910	0,674
	III	2,635	1,964
	IV	1,115	0,828
	Σύνολο:	5,728	3,973
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	Ι	2,176	1,622
	II	1,882	1,323
	Σύνολο:	4,085	2,945
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	Ι	2,161	0,837
	II	1,735	0,571
	III	3,060	1,449
	Σύνολο:	6,956	2,857
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	0,251	0,276
	II	1,106	0,850
	III	0,472	0,327
	IV	1,934	1,649
	V	0,118	0,080
	Σύνολο:	3,881	3,182
Άργος ΙΙ - Άστρος	Ι	0,265	0,007
	II	0,521	0,000
	III	0,350	0,000
	Σύνολο:	1,136	0,007
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	Ι	0,000	0,068
	II	0,000	0,350
	III	0,000	0,475
	Σύνολο:	0,000	0,893
Γιάννενα - Καλπάκι	Ι	0,823	0,051
	II	1,414	0,377
	Σύνολο:	2,237	0,428
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	0,812	0,411
	II	2,193	0,671
	III	2,724	0,754
	Σύνολο:	5,729	1,836

Πίνακας 6.6: Ετήσια αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

		Ετήσια εκτιμώμενα		
Γραμμή	Περιοχή	κεραυνικά σφάλματα		
		2003	2004	
Αχελώος - Άραχθος	Ι	1,629	1,844	
	II	1,851	2,962	
	III	1,331	1,096	
	Σύνολο:	4,811	5,902	
Ταυρωπός - Λαμία	Ι	0,364	0,296	
	II	0,881	0,364	
	III	0,380	0,190	
	Σύνολο:	1,625	0,850	
Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	Ι	0,272	1,753	
	II	0,000	0,414	
	Σύνολο:	0,272	2,167	
Κιλκίς - Σέρρες	Ι	0,276	0,845	
	II	0,729	2,064	
	III	0,078	0,982	
	Σύνολο:	1,083	3,891	
Άραχθος - Ηγουμενίτσα	Ι	1,442	1,058	
	II	1,654	0,830	
	III	4,653	2,724	
	Σύνολο:	7,749	4,612	
Μεγαλόπολη - Σπάρτη	Ι	0,000	0,058	
	II	0,000	0,325	
	III	0,022	1,723	
	Σύνολο:	0,022	2,106	
Άκτιο - Αργοστόλι	Ι	0,046	0,143	
	II	1,623	1,770	
	III	4,273	4,925	
	Σύνολο:	5,942	6,838	


Σχήμα 6.5.1: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Αθήνα-Αχελώος.



Σχήμα 6.5.2: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Θεσσαλονίκη-Αμύνταιο.



Σχήμα 6.5.3: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Θεσσαλονίκη-Καρδιά.



Σχήμα 6.5.4: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Κουμουνδούρου-Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.5.5: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άργος ΙΙ-Άστρος.



Σχήμα 6.5.6: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Βόλος ΙΙ-Λαύκος.



Σχήμα 6.5.7: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Γιάννενα-Καλπάκι.



Στήμα 6.5.8 Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Πύργος-Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.5.9: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Αχελώος-Άραχθος.



Σχήμα 6.5.10: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Ταυρωπός-Λαμία.



Σχήμα 6.5.11: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Ηγουμενίτσα-Σαγιάδα.



Σχήμα 6.5.12: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Κιλκίς-Σέρρες.



Σχήμα 6.5.13: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άραχθος-Ηγουμενίτσα.



Σχήμα 6.5.14: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Μεγαλόπολη-Σπάρτη.



Σχήμα 6.5.15: Σύγκριση καταγεγραμμένων και εκτιμώμενων από την προτεινόμενη μεθοδολογία κεραυνικών σφαλμάτων για τη γραμμή Άκτιο-Αργοστόλι.

6.5 Εφαρμογή μεθοδολογίας σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης για ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4 αποσκοπεί στο βέλτιστο σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, επιλέγοντας εκείνα τα κατάλληλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που θα ελαχιστοποιήσουν τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνούς. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αν και αναπτύχθηκε για να εφαρμοστεί σε νέες γραμμές μεταφοράς που πρόκειται να κατασκευαστούν, στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται στις δεκαπέντε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.2. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται φανερή η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, μιας και μπορούν άμεσα να συγκριθούν τα κεραυνικά σφάλματα που εκτιμώνται για τις γραμμές αυτές θεωρώντας ότι αυτές κατασκευάστηκαν με τα βέλτιστα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που προτείνει η μεθοδολογία.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 5.4, η προτεινόμενη μεθοδολογία προτείνει βέλτιστα χαρακτηριστικά μόνο για δύο κατασκευαστικές παραμέτρους, το επίπεδο μόνωσης των γραμμών και την αντίσταση γείωσης πύργων. Για τις υπόλοιπες κατασκευαστικές παραμέτρους λαμβάνονται υπόψη οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1].

Η μεθοδολογία απαιτεί τον διαχωρισμό των υπό ανάλυση γραμμών σε περιοχές. Για νέες γραμμές μεταφοράς ο διαχωρισμός αυτός μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί από τον σχεδιαστή αφού είναι γνωστή η όδευση που θα ακολουθήσει η γραμμή και κατά συνέπεια και η μορφολογία και σύσταση του εδάφους, όπως επίσης και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε όλο το μήκος της νέας γραμμής. Βέβαια για περιπτώσεις γραμμών όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ο διαχωρισμός αυτός αποτελεί μία σχετικά εύκολη εργασία μιας και οι γραμμές διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές κάνοντας εμφανές το διαχωρισμό τους. Ο διαχωρισμός των δεκαπέντε γραμμών στις οποίες θα εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2. Ο πίνακας 6.7 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς στις οποίες εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι το επίπεδο μόνωσης των γραμμών των 400 kV έχει θεωρηθεί ίσο με 1550 kV για όλο το μήκος αυτών, μιας και δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία από τη ΔΕΗ Α.Ε., υποεκτιμώντας ελαφρώς τον αριθμό των κεραυνικών σφαλμάτων αφού υπάρχουν και τμήματα γραμμών με επίπεδο μόνωσης ίσο με 1425 kV. Τέλος ο αριθμός των κεραυνικών σφαλμάτων για κάθε μία περιοχή υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.3 σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4 και αφορά το έτος 2004.

Ακολουθώντας κατά βήμα την προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδίασης της παραγράφου 5.4, υπολογίζονται εκείνα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (επίπεδο μόνωσης και αντίσταση γείωσης πύργων) για τα οποία ελαχιστοποιούνται τα κεραυνικά σφάλματα. Η μεθοδολογία αν και είναι αρκετά απλή και εύκολα εφαρμόσιμη απαιτεί τιμές για τα ακόλουθα στοιχεία που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της:

140

Γραμμή	Περιοχή	Επίπεδο μόνωσης (kV)	R (Ω)	Ν _Τ (Αριθμός κεραυνικών σφαλμάτων έτους 2004)	
Αθήνα - Αχελώος	Ι	1550	28,9	0,693	
	II	1550	6,5	0,551	
	III	1550	26,8	2,013	
	IV	1550	5,4	0,758	
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	Ι	1550	6,0	1,745	
	II	1550	11,6	1,149	
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	Ι	1550	1,9	0,695	
	II	1550	8,8	0,928	
	III	1550	18,2	1,812	
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	750	30,2	0,074	
	II	750	18,5	1,241	
	III	750	31,7	0,449	
	IV	750	4,7	1,656	
	V	750	49,0	0,000	
Άργος ΙΙ - Άστρος	Ι	750	4,2	0,000	
	II	750	8,1	0,000	
	III	750	60,4	0,000	
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	Ι	750	9,8	0,103	
	II	750	5,1	0,576	
	III	750	10,4	0,922	
Γιάννενα - Καλπάκι	Ι	750	4,2	0,000	
	II	750	25,8	0,498	
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	750	6,2	0,644	
	II	750	10,8	0,610	
	III	750	14,5	0,662	
Αχελώος - Άραχθος	Ι	750	3,0	1,940	
	II	750	3,1	2,338	
	III	750	3,6	2,239	
Ταυρωπός - Λαμία	Ι	750	11,4	0,322	
	II	750	24,9	0,558	
	III	750	7,3	0,401	
Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	Ι	750	57,5	1,722	
	II	750	14,9	0,534	

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά των υπό ανάλυση γραμμών μεταφοράς.

Γραμμή	Περιοχή	Επίπεδο μόνωσης (kV)	R (Ω)	Ν _Τ (Αριθμός κεραυνικών σφαλμάτων έτους 2004)
Κιλκίς - Σέρρες	Ι	750	2,0	1,343
	II	750	4,4	1,932
	III	750	1,8	0,854
Άραχθος - Ηγουμενίτσα	Ι	750	5,2	0,742
	II	750	13,0	1,273
	III	750	45,4	2,749
Μεγαλόπολη - Σπάρτη	Ι	750	5,1	0,181
	II	750	39,7	0,527
	III	750	11,2	1,064
Άκτιο - Αργοστόλι	Ι	750	4,8	0,231
	II	750	64,9	2,582
	III	750	126,3	3,722

α) το ετήσιο μέσο κόστος της μη διανεμόμενης ενέργειας για την επιχείρηση ηλεκτρισμού,

β) το μέσο κόστος για την επιδιόρθωση ενός μόνιμου σφάλματος,

γ) το ισοδύναμο ετήσιο ανά γραμμή κοινωνικό κόστος (κόστος των καταναλωτών),

δ) το συνολικό κόστος επένδυσης των κατασκευαστικών παραμέτρων της γραμμής
μεταφοράς (επιπέδου μόνωσης και αντίστασης γείωσης πύργων),

ε) το ετήσιο επιτόκιο,

στ) την εκτιμώμενη περίοδος εκμετάλλευσης της γραμμής σε έτη,

ζ) τον εμπειρικό συντελεστή που ορίζει το λόγο του ετήσιου κόστους συντήρησης
προς το συνολικό κόστος επένδυσης και

η) τα λειτουργικά όρια του επιπέδου μόνωσης και της αντίστασης γείωσης πύργων.

Οι τιμές των παραπάνω στοιχείων που αφορούν το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εφαρμογή παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα και έχουν διατεθεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1, 7], το Διαχειριστή Ενέργειας Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) [8], τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) [9], το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.) [10], καθώς επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί και στοιχεία από τα [11, 12, 13]. Ο πίνακας 6.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, στις δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμές. Η μεθοδολογία προτείνει νέες τιμές αντίστασης γείωσης πύργων και επιπέδου μόνωσης των γραμμών για κάθε μια περιοχή των υπό ανάλυση γραμμών με αποτέλεσμα η χρησιμοποίησή τους να ελαχιστοποιεί τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνό. Έτσι ενώ η ανακατασκευή των υπαρχόντων γραμμών με τα νέα προτεινόμενα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά είναι πρακτικά αδύνατη και ασύμφορη, ωστόσο η χρησιμότητα της μεθοδολογίας για νέες γραμμές γίνεται εύκολα φανερή, αφού η εξαρχής επιλογή του κατάλληλου επιπέδου μόνωσης και αντίστασης γείωσης πύργων ελαχιστοποιεί σημαντικά τα κεραυνικά σφάλματα.

Η μεθοδολογία κρίνεται ιδιαιτέρως χρήσιμη για γραμμές ανάλογες με αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, όπου παρατηρούνται πολλές διαφορές από περιοχή σε περιοχή, λόγω των διαφορετικών γεωγραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτές. Έτσι η ξεχωριστή σχεδίαση των περιοχών και η επιλογή των κατάλληλων κατασκευαστικών στοιχείων (επιπέδου μόνωσης γραμμών και αντίστασης γείωσης πύργων), που δεν επιφέρουν σοβαρές αλλαγές στην υπάρχουσα τυποποίηση που ακολουθείται από τις ηλεκτρικές εταιρίες συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων. Επιπλέον η προτεινόμενη μεθοδολογία κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη για ακτινικές γραμμές όπως αυτές που εξετάστηκαν στην παρούσα εφαρμογή, αφού ενδεχόμενο μόνιμο σφάλμα στις γραμμές αυτές συνεπάγεται τη μη τροφοδότηση καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια με όλα τα δυσάρεστα αποτελέσματα που αυτό μπορεί να επιφέρει.

Μειονέκτημα της μεθοδολογίας μπορεί να θεωρηθεί η πρόταση τιμών για το επίπεδο μόνωσης των γραμμών και της αντίστασης γείωσης πύργων που δύσκολα μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη, όπως για παράδειγμα επίπεδο μόνωσης ίσο με 760 kV ή αντίσταση γείωσης πύργων ίση με 3,2 Ohm ή 16,4 Ohm.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης μπορεί να αποδειχθεί ένα χρήσιμο εργαλείο στις μελέτες σχεδιαστών ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος, αποσκοπώντας στη μείωση των σφαλμάτων που προκαλούνται από κεραυνό.

143

		Επίπεδο		N _T	
Γραμμή	Περιοχή	μόνωσης	K (0)	(Εκτιμώμενος αριθμός	
		(kV)	(32)	κεραυνικών σφαλμάτων)	
Αθήνα - Αχελώος	I	1640	19,5	0,364	
	II	1550	4,7	0,482	
	III	1770	9,2	0,653	
	IV	1550	3,7	0,539	
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	Ι	1690	3,5	0,894	
	II	1590	4,4	0,389	
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	Ι	1710	1,9	0,540	
	II	1580	4,8	0,297	
	III	1700	3,1	0,363	
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	Ι	750	16,4	0,000	
	II	830	6,8	0,276	
	III	750	14,9	0.064	
	IV	860	2,2	0,630	
	V	750	49,0	0,000	
Άργος ΙΙ - Άστρος	Ι	750	4,2	0,000	
	II	750	8,1	0,000	
	III	750	60.4	0.000	
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	I	750	7.3	0.024	
	II	810	4.0	0 126	
	III	790	6.4	0 279	
Γιάννενα - Καλπάκι	I	750	42	0,000	
	Î	750	13.5	0,000	
Πύονος - Μεναλόπολη Η	I	750	43	0 134	
	П	750	6.8	0,205	
	III	750	7 2	0,250	
Αχελώος - Άραχθος	I	830	7,2 24	0,772	
Πλοπους Πραχους	I	820	2,1	0.833	
		860	2,1 2 5	0,629	
Ταυροπός Λαμία	T	750	2,5 8 3	0,029	
Γαθρωπός - Μαμία	I	750	0,5	0,210	
		750	27	0,000	
Ημουμουήσσα Σαρμάδα	111 T	730 800	3,7 16.0	0,175	
Πγουμεντισα - Σαγιασα	I II	800 750	7 1	0,211	
Vilitia Sécona	11 T	750 850	/,1	0,211	
κιλκίς - Σερρες	1	830	1,8	0,203	
	11	820	1,9	0,417	
<u> </u>		830	1,8	0,341	
Αραχθος - Ηγουμενιτσα	l	800	3,2	0,148	
	11	/90	4,8	0,239	
		830	9,/	0,5/5	
Μεγαλοπολη - Σπαρτη	1	/60	4,/	0,025	
		/50	15,3	0,174	
	111	820	6,3	0,262	
Ακτιο - Αργοστόλι	1	750	3,9	0,087	
	11	790	19,7	0,514	
	III	820	32,9	0,384	

Πίνακας 6.8: Προτεινόμενα βέλτιστα χαρακτηριστικά των υπό ανάλυση γραμμών.

6.6 Σύγκριση προτεινόμενων μεθοδολογιών με πραγματικά καταγεγραμμένα στοιχεία και με μεθοδολογία από τη διεθνή βιβλιογραφία

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών σε ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Στην παρούσα παράγραφο τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται τόσο με τα καταγεγραμμένα από τη ΔΕΗ Α.Ε. [1] δεδομένα σφαλμάτων όσο και με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του υπολογιστικού πακέτου εκτίμησης κεραυνικών σφαλμάτων FLASH [14, 15]. Ο λόγος της σύγκρισης αυτής είναι η διαπίστωση της αποτελεσματικότητας, αξιοπιστίας και αποδοτικότητας των προτεινόμενων μεθοδολογιών, καθώς επίσης και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι το υπολογιστικό πακέτο FLASH αποτελεί αποτέλεσμα μίας πολύχρονης προσπάθειας ερευνητών από όλο τον κόσμο που όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζει καλά αποτελέσματα σχετικά με την εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων. Ωστόσο, η εφαρμογή του στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης παρουσίασε αποδεκτά αποτελέσματα μόνο για τις γραμμές των 400 kV, ενώ για τις γραμμές των 150 kV τα αποτελέσματα απέχουν πολύ από τα πραγματικά σφάλματα που κατέγραψε η ΔΕΗ Α.Ε. [1]. Ο λόγος αυτός, των μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων του υπολογιστικό πακέτο FLASH για τις γραμμές των 150 kV, που αποτελούν περίπου το 88% των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης του ελληνικού συστήματος, καθώς επίσης και η απουσία κάποιου άλλου αντίστοιγου πακέτου ή μεθοδολογίας που να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του ελληνικού συστήματος, ήταν και η κύρια αφορμή για την ανάπτυξη των μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν σε αυτή τη διδακτορική διατριβή, προσαρμόζοντας αυτές στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιομορφίες τόσο του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και του ελλαδικού χώρου.

Στον πίνακα 6.9 παρουσιάζονται τα κεραυνικά σφάλματα που εκτιμήθηκαν στην παράγραφο 6.3 με τη χρήση αναλυτικής μεθόδου και στην παράγραφο 6.4 με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, για τις δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμές και για τα έτη 2003 και 2004. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται τα καταγεγραμμένα δεδομένα σφαλμάτων, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου FLASH.

Στα σχήματα 6.6.1 έως 6.6.15 παρουσιάζεται γραφικά το ποσοστιαίο σφάλμα των δύο προτεινόμενων μεθοδολογιών (χρήση αναλυτικής μεθόδου - απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα και ονομάζεται "Analytical" και τεχνητών νευρωνικών δικτύων απεικονίζεται με μπλέ χρώμα και ονομάζεται "ANN"), καθώς επίσης και του υπολογιστικού πακέτου FLASH - απεικονίζεται με πράσινο χρώμα και ονομάζεται "FLASH", με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα. Τόσο από τα σχήματα αυτά, όσο και από τον πίνακα 6.9 γίνεται φανερό ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες εκτιμούν τα κεραυνικά σφάλματα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από εκείνη που παρουσιάζει το υπολογιστικό πακέτο FLASH. Ο λόγος για τον οποίο το υπολογιστικό πακέτο FLASH κρίνεται μη αξιόπιστο (ιδιαιτέρως για τις γραμμές των 150 kV), έγκειται στις μεγάλες διαφορές που παρουσιάζει από τεχνικής πλευράς το ελληνικό σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης σε σχέση με τα αντίστοιχα άλλων χωρών (για τα οποία και αναπτύχθηκε το FLASH), στην τάση των γραμμών (χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή για γραμμές των 150 kV, ενώ δοκιμάστηκε διεθνώς για γραμμές από 345 kV και πάνω), αλλά και στις γεωγραφικές και μετεωρολογικές διαφορές που παρουσιάζονται από περιοχή σε περιοχή στον ελλαδικό χώρο σε σχέση με άλλες πιο ομοιόμορφες χώρες της υδρογείου.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, η αναλυτική μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου παρουσίασε αποδεκτά αποτελέσματα που προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής σε σχέση με άλλες αποτελεί ο διαχωρισμός των γραμμών σε περιοχές, εξαιτίας των διαφορετικών μετεωρολογικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που επικρατούν κατά μήκος των γραμμών, και η εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων για κάθε μία από αυτές ξεχωριστά. Επιπλέον δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις μηνιαίες μετεωρολογικές συνθήκες της κάθε γεωγραφικής περιοχής και της μηνιαίας αντίστασης γείωσης πύργων της κάθε περιοχής των υπό ανάλυση γραμμών, αποφεύγοντας την χρησιμοποίηση στους υπολογισμούς ετήσιων μέσων τιμών. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς δίνοντας την δυνατότητα στους

146

σχεδιαστές, αφενός μεν να προβαίνουν σε καλύτερη σχεδίαση αυτών, αφετέρου να συμβάλλουν στην πιο αποτελεσματική προστασία αυτών από κεραυνούς. Ωστόσο η προτεινόμενη μεθοδολογία εξακολουθεί να χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς της αρκετές εμπειρικές και προσεγγιστικές σχέσεις που παρόλο που έχουν δοκιμαστεί σε πολλές περιπτώσεις και για μεγάλο χρονικό διάστημα ενέχουν τον κίνδυνο διαφωνιών, λαθών και αμφισβήτησης.

Αντίθετα η μεθοδολογία εκτίμησης της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που προτάθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο και βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, απαλλάσσεται από τη χρησιμοποίηση εμπειρικών ή προσεγγιστικών σχέσεων ή ακόμα και δεδομένων που δύσκολα μπορούν να συγκεντρωθούν. Η μεθοδολογία χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς της μόνο πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς ή εκτιμώμενα δεδομένα βασισμένα όμως σε πραγματικές μετρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το να παρουσιάζει η μεθοδολογία μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς της και να κρίνεται ως ένα πολύ αξιόπιστο και χρήσιμο εργαλείο. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων που κατασκευάστηκε στην παράγραφο 6.4, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία του τετάρτου κεφαλαίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης του ελληνικού συστήματος. Για κάθε άλλο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η μεθοδολογία θα πρέπει να εφαρμοστεί ξανά, κατασκευάζοντας ένα νέο μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων, χρησιμοποιώντας για την κατασκευή του τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα του.

	Συνολικά κεραυνικά σφάλματα έτους 2003					
Γραμμή	Καταγεγραμμένα κεραυνικά σφάλματα	Μεθοδολογία Αναλυτική	Μεθοδολογία ΤΝΔ	FLASH		
Αθήνα - Αχελώος	6	5,897	5,728	7,219		
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	4	3,954	4,085	3,482		
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	7	7,678	6,956	7,214		
Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ	4	6,331	3,881	2,529		
Άργος ΙΙ - Άστρος	1	0,979	1,136	0,249		
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	0	0,054	0,000	0,017		
Γιάννενα - Καλπάκι	2	1,845	2,237	0,056		
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	6	5,218	5,729	0,381		
Αχελώος - Άραχθος	5	4,629	4,811	0,468		
Ταυρωπός - Λαμία	2	3,936	1,625	0,875		
Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	0	1,094	0,272	0,193		
Κιλκίς - Σέρρες	1	1,471	1,083	0,005		
Άραχθος - Ηγουμενίτσα	8	7,926	7,749	0,289		
Μεγαλόπολη - Σπάρτη	0	0,014	0,022	0,156		
Άκτιο - Αργοστόλι	6	5,504	5,942	1,676		
	Συνολικά κεραυνικά σφάλματα έτους 2004					
Γραμμή	Καταγεγραμμένα κεραυνικά σφάλματα	Μεθοδολογία Αναλυτική	Μεθοδολογία ΤΝΔ	FLASH		
Αθήνα - Αχελώος	4	4,015	3,973	5,519		
Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο	3	2,894	2,945	2,687		
Θεσσαλονίκη - Καρδιά	3	3,435	2,857	3,323		
Κουμουνδούρου- Μεγαλόπολη ΙΙ	3	3,420	3,182	1,622		
Άργος ΙΙ - Άστρος	0	0,000	0,007	0,121		
Βόλος ΙΙ - Λαύκος	1	1,601	0,893	0,008		
Γιάννενα - Καλπάκι	0	0,498	0,428	0,027		
Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ	2	1,916	1,836	0,433		
Αχελώος - Άραχθος	6	6,517	5,902	0,515		
Ταυρωπός - Λαμία	1	1,281	0,850	0,730		
Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα	2	2,256	2,167	0,193		
Κιλκίς - Σέρρες	4	4,129	3,891	0,072		
Άραχθος - Ηγουμενίτσα	5	5,164	4,612	0,378		
Μεγαλόπολη - Σπάρτη	2	1,772	2,106	0,148		

<u>Πίνακας 6.9:</u> Καταγεγραμμένα κεραυνικά σφάλματα και αποτελέσματα μεθοδολογιών εκτίμησης αυτών.



Σχήμα 6.6.1: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Αθήνα - Αχελώος.



Σχήμα 6.6.2: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Θεσσαλονίκη - Αμύνταιο.



Σχήμα 6.6.3: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Θεσσαλονίκη - Καρδιά.



Σχήμα 6.6.4: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Κουμουνδούρου - Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.6.5: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Άργος ΙΙ - Άστρος.



Σχήμα 6.6.6: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Βόλος ΙΙ - Λαύκος.



Σχήμα 6.6.7: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Γιάννενα - Καλπάκι.



Σχήμα 6.6.8: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Πύργος - Μεγαλόπολη ΙΙ.



Σχήμα 6.6.9: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Αχελώος - Άραχθος.



Σχήμα 6.6.10: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Ταυρωπός - Λαμία.



Σχήμα 6.6.11: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Ηγουμενίτσα - Σαγιάδα.



Σχήμα 6.6.12: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Κιλκίς - Σέρρες.



Σχήμα 6.6.13: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Άραχθος - Ηγουμενίτσα.



Σχήμα 6.6.14: Ποσοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων κεραυνικών σφαλμάτων με χρήση των προτεινόμενων μεθοδολογιών και του υπολογιστικού πακέτου FLASH με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα, για τα έτη 2003 και 2004 και τη γραμμή Μεγαλόπολη - Σπάρτη.





6.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στο τρίτο, τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι αφού παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι δεκαπέντε γραμμές μεταφοράς των 150 kV και 400 kV που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή, εκτιμάται η κεραυνική συμπεριφορά τους τόσο με τη χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας του τρίτου κεφαλαίου και της μεθοδολογίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων του τέταρτου κεφαλαίου, όσο και με τη χρήση μεθοδολογίας από τη διεθνή βιβλιογραφία, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτών με πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα σφαλμάτων. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες κρίνονται πολύ ικανοποιητικές παρουσιάζοντας αποτελέσματα που προσεγγίζουν και σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται με τα καταγεγραμμένα κεραυνικά σφάλματα, σε αντίθεση με την υπάρχουσα στη διεθνή βιβλιογραφία μεθοδολογία που παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις κυρίως για τις γραμμές των 150 kV. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία βέλτιστης σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης του πέμπτου κεφαλαίου, που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων, στις ίδιες δεκαπέντε υπό ανάλυση γραμμές, με σκοπό να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Αν και η μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε για να εφαρμοστεί σε νέες γραμμές, η εφαρμογή της στις υπάρχουσες δίνει χρήσιμα συμπεράσματα συγκρίνοντας τα σφάλματα που εκτιμώνται για τις γραμμές αυτές όπως έχουν ήδη κατασκευαστεί, με τα κεραυνικά σφάλματα που εκτιμώνται θεωρώντας ότι οι γραμμές αυτές κατασκευάστηκαν με τα βέλτιστα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που προτείνει η μεθοδολογία. Η μεθοδολογία βέλτιστης σχεδίασης μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στις μελέτες σχεδιαστών ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος, αποσκοπώντας στη μείωση των σφαλμάτων που προκαλούνται από κεραυνό.

6.8 Βιβλιογραφία

- [1] ΔΕΗ Α.Ε., "Ετήσια έκθεση δραστηριότητας γραμμών μεταφοράς", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, 2004
- [2] Στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Αθήνα, 2004
- [3] I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithm", IEEE Trans Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 100-106, 2005.
- [4] K. Berger, R.B. Anderson, H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes", Electra, no. 41, pp. 23-37, 1975
- [5] H. Demuth, M. Beale, "Neural network toolbox: For use with MATLAB", The Math Works, 1994
- [6] R. Lippmann, "An introduction to computing with neural nets", IEEE ASSP Magazine, vol. 4, no. 2, pp. 4-22, 1987
- [7] ΔΕΗ Α.Ε., "Μηνιαίο δελτίο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και πρώτων υλών", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, Απρίλιος 2005
- [8] Στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το Διαχειριστή Ενέργειας Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.), Αθήνα, 2005
- [9] P.A.E., Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, <u>www.rae.gr</u>
- [10]Τ.Ε.Ε., Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, www.tee.gr
- [11]T.H. Fritts, "Economic costs of electrical system instability and power outages caused by snakes on the Island of Guam", International Biodeterioration & Biodegradation, vol. 49, pp. 93-100, 2002
- [12]Η Καθημερινή Ημερήσια Πολιτική και Οικονομική Εφημερίδα

[13] S.M. Megalokonomos, E.N. Dialynas, V.C. Dali, "Interruption cost analysis for the agricultural electrical power customers in Greece", MedPower 2002, Athens, 2002

- [14]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, pp. 919-927, 1985
- [15]IEEE Working Group Report on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, "Estimating lightning performance of transmission lines II updates to analytical models", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, 1993

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα - Συμβολή

7.1 Συμπεράσματα

Οι κεραυνικές εκκενώσεις αποτελούν την κύρια αιτία διακοπών και σφαλμάτων για τις περισσότερες εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Πολλές μεθοδολογίες για την εκτίμηση των κεραυνικών σφαλμάτων έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν και πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για το πώς πρέπει να σχεδιάζονται οι γραμμές μεταφοράς ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνούς.

Οι πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία αν και κατάφεραν να περιγράψουν το πρόβλημα επαρκώς, εκτιμώντας την κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών και παρουσιάζοντας αποδεκτά αποτελέσματα, ωστόσο χρησιμοποιούν πολλές εμπειρικές σχέσεις και προσεγγίσεις που δέχτηκαν στο παρελθόν αλλά και μπορούν να δεχτούν στο μέλλον πολλές αμφισβητήσεις. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις οι μεθοδολογίες αυτές είναι αποδοτικές μόνο για τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα οποία αναπτύχθηκαν με

αποτέλεσμα η γενικευμένη εφαρμογή τους να παρουσιάζει μη αποδεκτά αποτελέσματα.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έρχεται να συμβάλει στις προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία πενήντα χρόνια, προτείνοντας νέες μεθοδολογίες τόσο για τον ακριβέστερο υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης (λαμβάνοντας υπόψη την απευθείας κεραυνοπληξία των γραμμών αλλά και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης), όσο και για τον καλύτερο σχεδιασμό των γραμμών μεταφοράς, αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων σε αυτές. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες προσεγγίζουν το πρόβλημα κάτω από ένα διαφορετικό έως σήμερα πρίσμα, με αποτέλεσμα όχι μόνο να απαγκιστρώνονται από τα προβλήματα και τα αδιέξοδα των έως σήμερα μεθοδολογιών, αλλά και να παρουσιάζουν αποτελέσματα πολύ καλύτερα από τις ήδη υπάρχουσες μεθοδολογίες.

Στη διδακτορική αυτή διατριβή ακολουθήθηκε η εξής διάρθρωση. Αρχικά παρουσιάστηκαν κεραυνικά και μετεωρολογικά στοιχεία και χαρακτηριστικά, καθώς επίσης και στοιχεία των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, απαραίτητα για την παρακολούθηση και κατανόηση της περαιτέρω διατριβής. Στη συνέχεια αφού προηγήθηκε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση των έως σήμερα εξελίξεων στον τομέα της εκτίμησης της κεραυνικής συμπεριφοράς και σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, παρουσιάστηκε όλο εκείνο το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίστηκαν οι προτεινόμενες μεθοδολογίες. Ακολούθησε αναλυτική ανάπτυξη των προτεινόμενων μεθοδολογιών και εφαρμογή αυτών σε εν λειτουργία ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (400 kV-150 kV, γραμμές ακτινικές και σε βρόγχο), αποσκοπώντας αφενός μεν την κατανόηση αυτών και αφετέρου την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας τους, της ακρίβειας και ευχρηστίας τους. Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των προτεινόμενων μεθοδολογιών τόσο αναμεταξύ τους και με τα αποτελέσματα άλλης μεθοδολογίας από τη διεθνή βιβλιογραφία, όσο και με πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα κεραυνικών σφαλμάτων εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

7.2 Συμβολή - Πρωτοτυπία

Η συμβολή-πρωτοτυπία της διδακτορικής αυτής διατριβής συνοψίζεται στα ακόλουθα σημεία:

 Πρόταση νέας αναλυτικής-πιθανοτικής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Έχοντας ως βάση μεθοδολογίες που προτάθηκαν από άλλους ερευνητές (ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο, προσομοίωση Monte-Carlo), αναπτύχθηκε μία νέα αναλυτική-πιθανοτική μεθοδολογία που υπολογίζει τα σφάλματα γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που οφείλονται τόσο σε απευθείας κεραυνοπληξίας των γραμμών, όσο και στο φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Η μεθοδολογία αυτή βελτιώνει και επεκτείνει τις προηγούμενες μελέτες, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια, διαχωρίζοντας για πρώτη φορά τις γραμμές μεταφοράς σε περιοχές και διεξάγοντας την ανάλυση για κάθε μία περιοχή ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς της τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτών.

 Ανάπτυξη υπολογιστικού πακέτου (λογισμικού), με βάση τη νέα αναλυτικήπιθανοτική μεθοδολογία, για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Ένα νέο εύχρηστο και φιλικό ως προς το χρήστη πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (λογισμικό) δημιουργήθηκε, για να εξυπηρετήσει τους πολλούς και περίπλοκους υπολογισμούς της νέας αναλυτικής-πιθανοτικής μεθοδολογίας. Το πρόγραμμα είναι απλό και ευέλικτο σε αλλαγές και τροποποιήσεις, έχοντας τη δυνατότητα να υποστηρίζει εκτός από τους τύπους πύργων, τα επίπεδα μόνωσης και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και λήφθηκαν υπόψη στην υπολογιστική διαδικασία, οποιαδήποτε αλλά χαρακτηριστικά. Το υπολογιστικό αυτό πακέτο, το οποίο μπορεί κάλλιστα να ανταγωνιστεί άλλα εφάμιλλα που διατίθενται στο εμπόριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μελέτες σχεδιαστών ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος αποσκοπώντας στην πιο αποτελεσματική προστασία αυτών από κεραυνούς.

 Πρόταση νέας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Η μεθοδολογία αυτή, τελείως ανεξάρτητη από τις μέχρι σήμερα διεθνής ερευνητικές προσπάθειες, χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, υπολογιστική νοημοσύνη και πιο συγκεκριμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία απαγκιστρώνεται από τις έως σήμερα εμπειρικές και προσεγγιστικές εξισώσεις και παραδοχές και βασίζεται μόνο σε πραγματικά στοιχεία και παραμέτρους των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης (μετεωρολογικά και κατασκευαστικά), που αναμφίβολα κατέχουν μείζονα ρόλο στην ύπαρξη και δημιουργία των κεραυνικών σφαλμάτων. Οι παράμετροι και τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και να αποκτήσει εκείνη την απαραίτητη γνώση, έτσι ώστε κατάλληλα να μπορεί να ανταποκριθεί σε νέα γεγονότα. Η μεθοδολογία παρουσιάζεται πολύ αξιόπιστη και αποτελεσματική, δίδοντας αποτελέσματα σχεδόν ταυτόσημα με τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα κεραυνικών σφαλμάτων αποτελώντας ένα χρήσιμο εργαλείο για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

 Πρόταση νέας μεθοδολογίας για την σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κεραυνικών σφαλμάτων.

Μια νέα μεθοδολογία σχεδίασης γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης παρατίθεται που προτείνει τις βέλτιστες εκείνες τιμές κατασκευαστικών παραμέτρων (επίπεδο μόνωσης γραμμών και αντίσταση γείωσης πύργων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των γραμμών, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα μελλοντικά κεραυνικά σφάλματα. Σημαντικό σημείο στη μεθοδολογία αυτή αποτελεί το γεγονός ότι η γενικότερη τυποποίηση που ακολουθούν οι ηλεκτρικές εταιρίες σε σχέση με τη σχεδίαση των γραμμών μεταφοράς παραμένει αμετάβλητη, αφού τα μόνα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται είναι το επίπεδο μόνωσης των γραμμών και η αντίσταση γείωσης πύργων. Επιπλέον η μεθοδολογία διαχωρίζει τις γραμμές σε περιοχές πραγματοποιώντας τη σχεδίαση ζεχωριστά για κάθε μία από αυτές και όχι για όλο το μήκος των γραμμών, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για γραμμές τέτοιες όπως αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

 Ανάλυση των γραμμών μεταφοράς σε περιοχές λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους κατασκευαστικά και μετεωρολογικά στοιχεία των περιοχών.

Σε αντίθεση με άλλες μεθοδολογίες από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι μεθοδολογίες που αναπτύσσονται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή διαχωρίζουν και εξετάζουν τις υπό ανάλυση γραμμές σε περιοχές και δεν τις αντιμετωπίζουν με ενιαίο τρόπο για όλο το μήκος τους. Αυτή η τεχνική κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη για γραμμές ανάλογες με αυτές του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι γραμμές λόγω της ιδιομορφίας του ελλαδικού χώρου διέρχονται ταυτόχρονα από πεδιάδες, ακτογραμμές και/ή ορεινές περιοχές. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και για γραμμές με μη ομοιόμορφη κατασκευή για όλο το μήκος τους, περίπτωση που δεν εξετάστηκε όμως στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

 Λεπτομερή ανάλυση της επίδρασης της μηνιαίας μεταβολής της αντίστασης γείωσης πύργων και της κεραυνικής στάθμης στην κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες λαμβάνουν υπόψη στους υπολογισμούς τους τις μηνιαίες τιμές της αντίστασης γείωσης πύργων και της κεραυνικής στάθμης σε αντίθεση με τις ετήσιες μέσες τιμές που χρησιμοποιούν οι άλλες μεθοδολογίες. Με βάση τα αποτελέσματα των προτεινόμενων μεθοδολογιών σε ελληνικές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με τη χρήση μηνιαίων και ετήσιων τιμών, αποδεικνύεται η μεγάλη σημασία που έχει η μεταβολή των παραμέτρων αυτών κατά τη διάρκεια του έτους στην κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών, αφού παρουσιάζονται διαφορές στα αποτελέσματα που φτάνουν σε ποσοστό 67% με τη μέση διαφορά των αποτελεσμάτων να κυμαίνεται σε ποσοστό 15% με 20%.

7.3 Επέκταση της διατριβής

Ενδεχόμενη επέκταση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα μπορούσε να ήταν η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών και σε άλλα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πέραν του ελληνικού, με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η εφαρμογή αυτή θα επέφερε πολλές τροποποιήσεις στις προτεινόμενες μεθοδολογίες (χωρίς βέβαια να τροποποιούνται οι βασικές αρχές των μεθοδολογιών), μιας και αυτές αναπτύχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τους την υπάρχουσα τυποποίηση που ακολουθείται από τη ΔΕΗ Α.Ε.

Σε συνέχεια των παραπάνω θα μπορούσε να εξεταστεί και να ενσωματωθεί στις προτεινόμενες μεθοδολογίες η εφαρμογή ή όχι αλεξικέραυνων (surge arresters), η εξέταση για την παρουσία ή όχι δένδρων κοντά στις γραμμές, η επιλογή του κατάλληλου ύψους των αγωγών φάσης και αγωγών προστασίας, η γεωμετρία των πύργων, καθώς επίσης και η επιλογή των κατάλληλων γωνιών προστασίας, στην προσπάθεια να εκτιμηθεί καλύτερα και να βελτιωθεί η κεραυνική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που οφείλονται σε κεραυνό.

<u>Παράρτημα</u>

Οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας σχεδίασης του πέμπτου κεφαλαίου και αφορούν το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής:

α) το ετήσιο μέσο κόστος της μη διανεμόμενης ενέργειας για την επιχείρηση ηλεκτρισμού ισούται με $1,2 \in / kWh [1, 2, 3]$,

β) το μέσο κόστος για την επιδιόρθωση ενός μόνιμου σφάλματος ισούται με 540 \in / μόνιμο σφάλμα [1, 2, 4],

γ) το ισοδύναμο ετήσιο ανά γραμμή κοινωνικό κόστος (κόστος των καταναλωτών)
ισούται με: 30 € / kW [5, 6, 7, 8],

δ) το συνολικό κόστος επένδυσης των κατασκευαστικών παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς (και), ισούται με: 250 € για 75 kV επιπέδου μόνωσης και επιπλέον 20 € για κάθε επόμενα 75 kV επιπέδου μόνωσης και 410 € για κάθε 7 Ω μείωση της αντίστασης γείωσης πύργων και επιπλέον 10 € για κάθε 5 Ω επιπλέον μείωσης [1, 2, 3],

ε) το ετήσιο επιτόκιο αναγωγής ισούται με 6% [5],

στ) η εκτιμώμενη περίοδος εκμετάλλευσης της γραμμής ισούται με 50 έτη [4],

ζ) ο εμπειρικός συντελεστής που ορίζει το λόγο του ετήσιου κόστους συντήρησης προς το συνολικό κόστος επένδυσης ισούται με 0,0031 και

η) τα λειτουργικά όρια του επιπέδου μόνωσης ισούνται με 750 kV - 1000 kV και της αντίστασης γείωσης πύργων ισούνται με 1 Ω - 100 Ω [1, 2].

Βιβλιογραφία Παραρτήματος

 [1] ΔΕΗ Α.Ε., "Ετήσια έκθεση δραστηριότητας γραμμών μεταφοράς", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, 2004

[2] ΔΕΗ Α.Ε., "Μηνιαίο δελτίο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και πρώτων υλών", Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, Απρίλιος 2005

- [3] P.A.E., Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, <u>www.rae.gr</u>
- [4] Στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το Διαχειριστή Ενέργειας Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.), Αθήνα, 2005
- [5] Τ.Ε.Ε., Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, <u>www.tee.gr</u>

- [6] S.M. Megalokonomos, E.N. Dialynas, V.C. Dali, "Interruption cost analysis for the agricultural electrical power customers in Greece", MedPower 2002, Athens, 2002
- [7] T.H. Fritts, "Economic costs of electrical system instability and power outages caused by snakes on the Island of Guam", International Biodeterioration & Biodegradation, vol. 49, pp. 93-100, 2002
- [8]] Η Καθημερινή Ημερήσια Πολιτική και Οικονομική Εφημερίδα