



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Αντικεραυνική προστασία εγκαταστάσεων μέσης και υψηλής τάσης με καθοδικά αλεξικέραυνα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασία Δ. Μητροπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

144

Αντικεραυνική προστασία εγκαταστάσεων μέσης και υψηλής τάσης με καθοδικά αλεξικέραυνα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασία Δ. Μητροπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτώβριο 2008.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

.....
Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2008

.....
Αναστασία Δ. Μητροπούλου

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

Copyright © Αναστασία Δ. Μητροπούλου, 2008.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, την οποία εκπονήσαμε από κοινού οι δύο υπογράφωντες Χρήστος Αποστολάκης και Αναστασία Μητροπούλου, είναι η μελέτη της εφαρμογής των αλεξικέραυνων σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Η μελέτη αυτή γίνεται με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων και συγκεκριμένα με την βοήθεια των προγραμμάτων MATLAB(Simulink) και PSCAD/EMTDC. Πριν από τις τελικές προσομοιώσεις παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο, στο οποίο στηρίζεται η εργασία, και μία σύντομη ανασκόπηση των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί γύρω από τα θέματα που διαπραγματεύονται.

Η πρώτη προσομοίωση αφορά γραμμές μεταφοράς των 150kV, όπου υπολογίζεται η πιθανότητα καταστροφής των αλεξικέραυνων. Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα είναι η αντίσταση γείωσης (R_g), η ενέργεια αντοχής των αλεξικέραυνων και το βήμα τοποθέτησής τους. Οι πιθανότητες αυτές χρησιμοποιούνται αργότερα ως δεδομένα για την εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου.

Η δεύτερη προσομοίωση αφορά την προστασία υποσταθμού από αλεξικέραυνα και έγινε και αυτή με χρήση του MATLAB. Κατασκευάστηκε εύχρηστο πρόγραμμα το οποίο λαμβάνει από τον χρήστη δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο μπορούν και εδώ, όπως και στις γραμμές μεταφοράς, να υπολογιστούν πιθανότητες σφαλμάτων στα αλεξικέραυνα μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους.

Τέλος, με την βοήθεια του προγράμματος PSCAD/EMTDC έγινε προσομοίωση αιολικού πάρκου. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε το φαινόμενο της ανάστροφης αγωγής αλεξικέραυνων και πως αυτή επηρεάζει τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου που δεν δέχθηκαν το κεραυνικό πλήγμα και τα υπόλοιπα ηλεκτρολογικά μέρη του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

κεραυνός, γραμμές μεταφοράς, αλεξικέραυνο, υποσταθμός, αιολικό πάρκο, ανεμογεννήτρια, ανάστροφη αγωγή αλεξικέραυνου, νευρωνικό δίκτυο, προσομοίωση, Simulink, PSCAD

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis, which was written by Christos Apostolakis and Anastasia Mitropoulou, is the study of the application of surge arresters in high voltage installations. The progress of the research was helped by the use of appropriate computer programs, like MATLAB(Simulink) and PSCAD/EMTDC. Before the final simulations, is presented the theoretical base, on which the thesis is based, and a brief review of the relevant studies that have been conducted about these issues.

The first simulation concerns transmission lines of 150kV, where is estimated the probability of the surge arresters' destruction. The factors which influence the results are the grounding resistance (R_g), the energy tolerance of the surge arresters and their location step. These probabilities will be used later as data for the training of a neural network.

The second simulation concerns the protection of a substation by surge arresters and was done also in MATLAB. An easy program to handle with was designed to receive data from the user. In this way probabilities of surge arresters failures can be estimated by converting different parameters.

Finally, with the use of PSCAD program, a wind farm was simulated. Especially, was studied the phenomena of back flow surge of surge arresters and how this phenomena influence the wind generators of the wind farm that were not stroken by the lightning and the rest of its electrical parts.

KEY WORDS

lightning, transmission lines, surge arrester, substation, wind farm, wind generators, back flow surge of surge arresters, neural network, simulation, Simulink, PSCAD

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή καθοδικών αλεξικέραυνων σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων (MATLAB, Simulink, PSCAD) προσομοιώνονται γραμμές μεταφοράς των 150kV, ένα υποσταθμός και ένα αιολικό πάρκο και υπολογίζεται η πιθανότητα καταστροφής αλεξικέραυνων. Αναλυτικά:

Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιγράφεται το φαινόμενο του κεραυνού και παρουσιάζονται οι κίνδυνοι, οι οποίοι πηγάζουν από αυτόν.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του αλεξικέραυνου ως μέσο προστασίας από υπερτάσεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** συνεχίζονται οι παρουσιάσεις των απαραίτητων θεωρητικών γνώσεων με μια εισαγωγή στις γραμμές μεταφοράς και διανομής. Παρουσιάζεται το Ελληνικό Σύστημα Διανομής, κατηγοριοποιούνται οι γραμμές μεταφοράς, αναφέρονται τα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** έχουμε παραθέσει τους τρόπους αντικεραυνικής προστασίας των γραμμών μεταφοράς, ενώ γίνεται και εκτενής αναφορά στο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο MATLAB για τον υπολογισμό της πιθανότητας καταστροφής αλεξικέραυνων σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Γίνεται πλήρης περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, των στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο και του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε. Μετά από την εξέταση διαφορετικών περιπτώσεων εξάγονται συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο MATLAB για τον υπολογισμό της πιθανότητας καταστροφής αλεξικέραυνων σε υποσταθμό. Και εδώ, όπως και στις γραμμές μεταφοράς, γίνεται πλήρης περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και των στοιχείων του μοντέλου. Επιπροσθέτως, κατασκευάστηκε διεπαφή (interface), το οποίο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να μεταβάλλει τους παράγοντες της προσομοίωσης.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** ξεκινάμε με μία εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα και καταλήγουμε στην εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιώντας την μάθηση Q. Με την βοήθεια του νευρωνικού αυτού δικτύου, καθίσταται δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων για τις πιθανότητες σφάλματος των αλεξικέραυνων σε γραμμές μεταφοράς και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την βοήθεια του Simulink.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το μοντέλο ενός αιολικού που δημιουργήθηκε στο PSCAD για την μελέτη του φαινομένου της ανάστροφης αγωγής αλεξικέραυνων. Γίνεται πλήρης περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και των στοιχείων του μοντέλου. Μεταβάλλονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και παρατίθενται αναλυτικά διαγράμματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο σημείο αυτό θεωρούμε υποχρέωσή μας να ευχαριστήσουμε θερμά όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και πιο συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής και την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μας.

Τον κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τον χρόνο που διέθεσε, την υπομονή που επέδειξε, την άψογη συνεργασία μας και για την μεταλαμπάδευση των γνώσεών του προς εμάς καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για τη βοήθειά του στο κομμάτι των προσομοιώσεων με το πρόγραμμα PSCAD.

Τον κ. Λάμπρο Οικονόμου, Δόκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών και Επίκουρο Καθηγητή ΑΣΠΕΤΕ για την βοήθειά του στο κομμάτι των προσομοιώσεων και των νευρωνικών δικτύων.

Τον κ. Γεράσιμο Σπανάκη, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών και Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την βοήθειά του στο κομμάτι των νευρωνικών δικτύων.

Τον κ. Κωνσταντίνο Πελεχρίνη, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών και Υποψήφιο Διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο του Riverside των ΗΠΑ για την βοήθειά του στο MATLAB.

Τέλος, τις οικογένειές μας για όλα όσα μας πρόσφεραν κατά την πενταετή φοίτησή μας στο Ε.Μ.Π, για τα εφόδια που μας παρείχαν πριν από αυτή και για όλη την ηθική και υλική στήριξη που μας προσφέρουν σε όλη μας τη ζωή.

Χρήστος Ι. Αποστολάκης
Αναστασία Δ. Μητροπούλου
Οκτώβριος 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| Περίληψη – Λέξεις Κλειδιά..... | 1 |
| Abstract – Key Words..... | 2 |
| Πρόλογος..... | 3 |
| Περιεχόμενα..... | 6 |
| Κεφάλαιο 1 - Γενικά περί υπερτάσεων..... | 11 |
| 1.1.Εξωτερικές υπερτάσεις - Στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών..... | 11 |
| 1.1.1.Γενικά περί κεραυνού..... | 11 |
| 1.1.2.Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη..... | 12 |
| 1.1.3.Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων..... | 13 |
| 1.1.4.Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων..... | 15 |
| 1.1.5.Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων..... | 17 |
| 1.1.6.Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό..... | 18 |
| 1.1.7.Παράμετροι κεραυνού..... | 19 |
| 1.1.8.Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες..... | 19 |
| 1.1.9.Αποτελέσματα κεραυνού..... | 20 |
| 1.2.Εσωτερικές υπερτάσεις..... | 21 |
| 1.3.Βιβλιογραφία..... | 22 |
| Κεφάλαιο 2 - Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης..... | 23 |
| 2.1.Εισαγωγή..... | 23 |
| 2.2.Είδη αλεξικέραυνων..... | 23 |
| 2.2.1.Αλεξικέραυνα με διάκενα..... | 24 |
| 2.2.2.Αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα..... | 29 |
| 2.3.Βιβλιογραφία..... | 35 |

Κεφάλαιο 3 - Γραμμές μεταφοράς..... 37

| | |
|--|----|
| 3.1.Εισαγωγή στις γραμμές μεταφοράς και διανομής..... | 37 |
| 3.1.1.Εισαγωγή..... | 37 |
| 3.1.2.Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής στην Ελλάδα..... | 38 |
| 3.2.Κατηγοριοποίηση των γραμμών μεταφοράς..... | 39 |
| 3.3.Ηλεκτρικά μεγέθη γραμμών μεταφοράς..... | 41 |
| 3.3.1.Ωμική αντίσταση (R)..... | 42 |
| 3.3.2.Αυτεπαγωγή (L)..... | 43 |
| 3.3.3.Εγκάρσια χωρητικότητα (C)..... | 44 |
| 3.3.4.Εγκάρσια αγωγιμότητα (G)..... | 44 |
| 3.4.Μηχανικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς..... | 45 |
| 3.4.1.Υπολογισμός καμπύλης και βέλους αγωγών..... | 45 |
| 3.4.2.Επίδραση ανέμου και πάγου..... | 48 |
| 3.5.Βασική Στάθμη Μόνωσης (Basic Insulation Level)..... | 48 |
| 3.5.1.Συμβατική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης..... | 49 |
| 3.5.2.Στατιστική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης..... | 49 |
| 3.5.3.Ημιστατιστική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωση..... | 51 |
| 3.5.4.Στάθμες μονώσεως δικτύων..... | 52 |
| 3.6.Βιβλιογραφία..... | 53 |

Κεφάλαιο 4 - Αντικεραυνική προστασία γραμμών μεταφοράς..... 54

| | |
|---|----|
| 4.1.Κεραυνικά πλήγματα στις γραμμές μεταφοράς..... | 54 |
| 4.1.1.Άμεσο κεραυνικό πλήγμα επί του αγωγού φάσης..... | 54 |
| 4.1.2.Ανάστροφη διάσπαση..... | 55 |
| 4.1.3.Επαγόμενο κεραυνικό πλήγμα..... | 56 |
| 4.2.Αντικεραυνική προστασία γραμμών μεταφοράς..... | 57 |
| 4.3.Γραμμή μεταφοράς με αγωγούς προστασίας – Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο..... | 60 |
| 4.4.Βιβλιογραφία..... | 63 |

Κεφάλαιο 5 - Υπολογισμός πιθανότητας καταστροφής καθοδικών αλεξικέραυνων σε γραμμή υψηλής τάσης..... 64

| | |
|---|----|
| 5.1.Εισαγωγή..... | 64 |
| 5.1.1.Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... | 64 |
| 5.2.Εξίσωση κεραυνικού ρεύματος..... | 66 |
| 5.3.Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου..... | 67 |
| 5.4.Ενέργεια αλεξικέραυνου..... | 69 |
| 5.5.Αλγόριθμος για τον υπολογισμό σφαλμάτων..... | 69 |
| 5.6.Προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος σε γραμμή μεταφοράς και υπολογισμός σφάλματος αλεξικέραυνου..... | 70 |
| 5.6.1.Προσομοίωση για άμεσο κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης..... | 71 |
| 5.6.2.Προσομοίωση για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό γης..... | 78 |
| 5.6.3.Ολική πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου..... | 89 |
| 5.7.Η επόμενη μέρα..... | 91 |
| 5.8.Βιβλιογραφία..... | 92 |

Κεφάλαιο 6 - Επίδραση της θέσης σύνδεσης καθοδικού αλεξικέραυνου σε μετασχηματιστή..... 94

| | |
|---|-----|
| 6.1.Εισαγωγή..... | 94 |
| 6.2.Επίδραση της θέσης και τρόπου σύνδεσης του αλεξικέραυνου στη στάθμη προστασίας..... | 95 |
| 6.3.Προσομοίωση υποσταθμού..... | 98 |
| 6.4.Δημιουργία διεπαφής (interface) για εισαγωγή παραμέτρων και εμφάνιση αποτελεσμάτων..... | 101 |
| 6.4.1.Εισαγωγή των παραμέτρων της προσομοίωσης..... | 101 |
| 6.4.2.Εμφάνιση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης..... | 102 |
| 6.5.Βιβλιογραφία..... | 102 |

Κεφάλαιο 7 - Νευρωνικά δίκτυα..... 103

| | |
|---|-----|
| 7.1.Βασικές έννοιες..... | 103 |
| 7.1.1.Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρονίου..... | 104 |
| 7.2.Αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων..... | 109 |
| 7.2.1.Γενικά..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| 7.2.2.Νευρωνικά δίκτυα προσοτροφodότησης..... | 110 |
| 7.2.3.Αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (νευρωνικά δίκτυα ανατροφodότησης)..... | 111 |
| 7.3.Μάθηση των νευρωνικών δικτύων..... | 114 |
| 7.3.1.Γενικά..... | 114 |
| 7.3.2.Μάθηση διόρθωσης σφάλματος..... | 115 |
| 7.3.3.Μάθηση Hebb..... | 116 |
| 7.3.4.Ανταγωνιστική μάθηση..... | 117 |
| 7.3.5.Μάθηση Boltzmann..... | 119 |
| 7.3.6.Επιβλεπόμενη μάθηση..... | 120 |
| 7.3.7.Μη επιβλεπόμενη μάθηση..... | 121 |
| 7.3.8.Ενισχυτική μάθηση..... | 122 |
| 7.3.8.1.Εισαγωγή..... | 122 |
| 7.3.8.2.Μοντέλο ενισχυτικής μάθησης..... | 123 |
| 7.3.9.Το μοντέλο μάθησης Q..... | 124 |
| 7.3.9.1.Υλοποίηση του μοντέλου μάθησης Q..... | 124 |
| 7.3.9.2.Ανάπτυξη του μοντέλου..... | 126 |
| 7.3.9.3.Το σύστημα ενισχυτικής μάθησης..... | 127 |
| 7.4.Ανάπτυξη του μοντέλου..... | 130 |
| 7.5.Η επόμενη μέρα..... | 132 |
| 7.6.Βιβλιογραφία..... | 132 |

Κεφάλαιο 8 – Μελέτη ανάστροφης αγωγής αλεξικέραυνων – Εφαρμογή σε αιολικό πάρκο..... 133

| | |
|--|-----|
| 8.1.Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες..... | 133 |
| 8.1.1.Εισαγωγή – Γενικά για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 133 |
| 8.1.2.Γενικά για την αιολική ενέργεια..... | 134 |
| 8.2.Είδη ανεμογεννητριών..... | 136 |
| 8.3.Κατασκευαστική διαμόρφωση μιας ανεμογεννήτριας..... | 138 |
| 8.4.Η υπάρχουσα κατάσταση..... | 140 |
| 8.5.Αιολικά πάρκα..... | 144 |
| 8.5.1.Σχεδιασμός αιολικών πάρκων..... | 145 |
| 8.5.2.Μελέτες για την τοποθέτηση αιολικών πάρκων..... | 146 |
| 8.5.3.Κατασκευές αιολικών πάρκων..... | 150 |

| | |
|---|------------|
| 8.5.4.Σύνδεση στο δίκτυο..... | 153 |
| 8.6.Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων..... | 158 |
| 8.6.1.Εισαγωγή..... | 158 |
| 8.6.2.Συστήματα γειώσεων..... | 158 |
| 8.6.3.Απόκριση συστήματος γείωσης σε βραχυκυκλώματα και κεραυνικά πλήγματα..... | 160 |
| 8.6.4.Απαιτούμενος βαθμός προστασίας – Συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων – Κίνδυνος έκθεσης..... | 160 |
| 8.7.Τυπικός σχεδιασμός του ηλεκτρικού μέρους ενός αιολικού πάρκου..... | 162 |
| 8.8.Περιγραφή τυπικού συστήματος γείωσης αιολικών πάρκων..... | 163 |
| 8.9.Ανάστροφη αγωγή αλεξικέραυνων – Εφαρμογή σε αιολικά πάρκα..... | 164 |
| 8.10.Το μοντέλο της ανάλυσης..... | 165 |
| 8.10.1.Μοντέλο του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών..... | 165 |
| 8.10.2.Μοντέλο αλεξικέραυνου..... | 167 |
| 8.11.Προσομοίωση στο PSCAD..... | 167 |
| 8.11.1.Ύπαρξη και μη ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης... .. | 167 |
| 8.11.2.Μεταβολές στην τιμή της αντίστασης γείωσης..... | 173 |
| 8.12.Η επόμενη μέρα..... | 179 |
| 8.13.Βιβλιογραφία..... | 180 |
| Παράρτημα Ι..... | 181 |
| Παράρτημα ΙΙ..... | 183 |

Κεφάλαιο 1

Γενικά περί υπερτάσεων

1.1.Εξωτερικές υπερτάσεις - Στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών

1.1.1.Γενικά περί κεραυνού

Η κεραυνική εκκένωση μπορεί να οριστεί ως μια μορφή ηλεκτρικής διάσπασης, χαρακτηριζόμενη από υψηλό ρεύμα, που συμβαίνει σε πολύ μεγάλα διάκενα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση να προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα.



Ο κεραυνός αποτελείται από ένα οπτικό φαινόμενο, την αστραπή, που οφείλεται στην πυράκτωση των μορίων του αέρα, και από το καθαρά ηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή

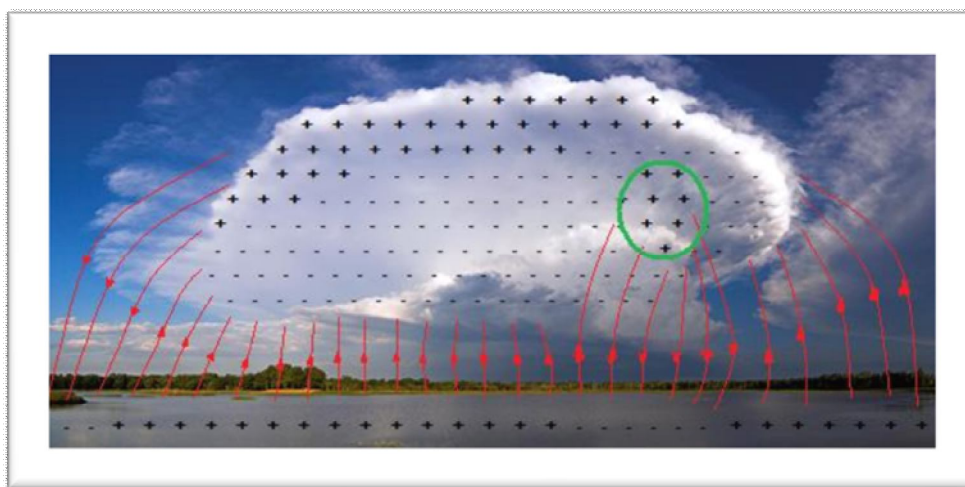
τη ροή των ηλεκτρικών φορτίων, που συνοδεύεται από τη βροντή, εξαιτίας της απότομης εκτόνωσης των αερίων της περιοχής.

1.1.2. Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη

Έως σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία αναφορικά με το μηχανισμό ηλεκτρίσης 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 [1].

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 [2]. Σύμφωνα με τα φαινόμενα αυτά και συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

α) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο 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 σύννεφα 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 σύννεφου 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 σύννεφου (Σχήμα 1.1).



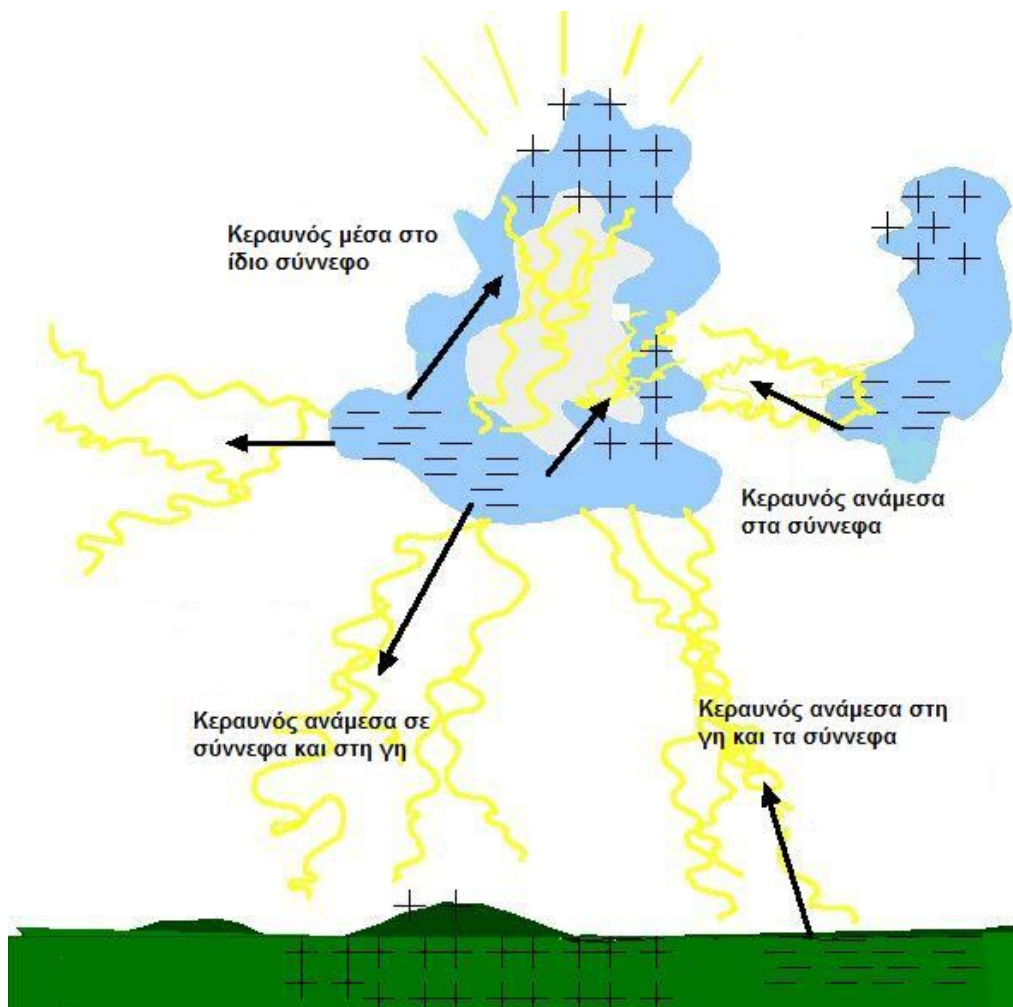
Σχήμα 1.1: Κατανομή του φορτίου εντός του νέφους και ηλεκτρικό πεδίο νέφους-γης.

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

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

1.1.3.Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (Σχήμα 1.2):



Σχήμα 1.2: Τα είδη των κεραυνών και η κατανομή του φορτίου στα νέφη κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.

α) Μεταξύ σύννεφου 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 μεταξύ σύννεφου και γης 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) Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα:



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.

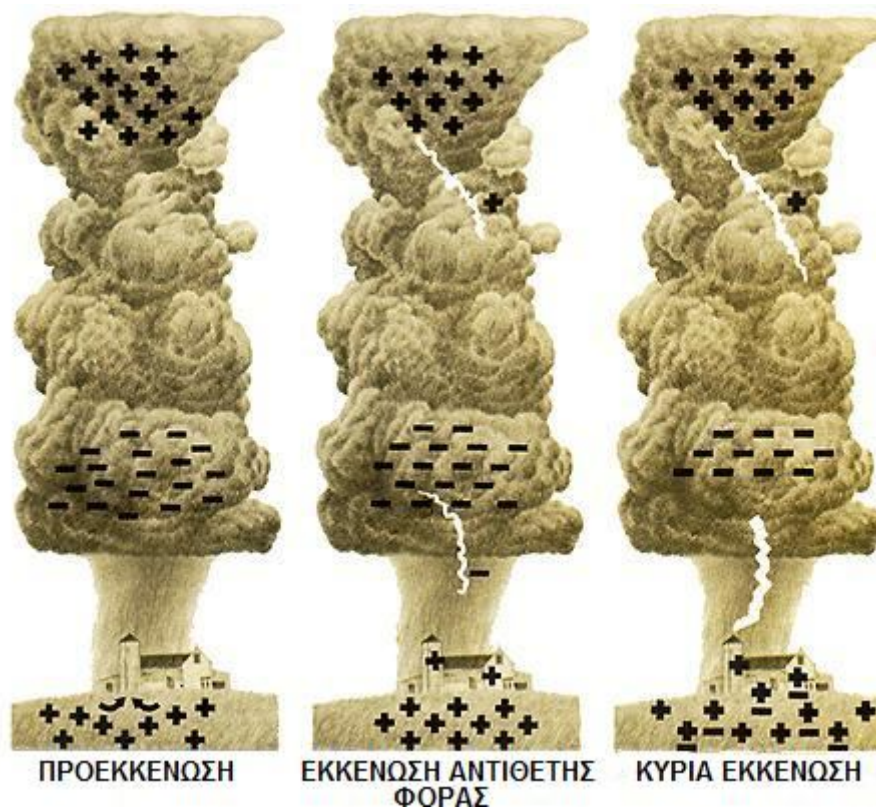
γ) Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα:



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.

1.1.4.Φάσεις κεραυνικών εκκένωσης

Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας διακρίνουμε τις τρεις ακόλουθες φάσεις κεραυνικής εκκένωσης (Σχήμα 1.3):



Σχήμα 1.3: Οι τρεις φάσεις κεραυνικής εκκένωσης κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.

α) Προεκκένωση:

Το ηλεκτρισμένο νέφος λίγο πριν από μια κεραυνική εκκένωση εμφανίζεται μακροσκοπικά σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο, εξαιτίας του οποίου επάγονται στο έδαφος πεδία με ένταση πάνω από 5kV/m. Στις παρυφές περιοχών του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι υψηλές αυτές εντάσεις, συνδυαζόμενες με τη μικρή πυκνότητα του αέρα και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης.

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού, ο οποίος ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Ο οχετός ακολουθεί την κατεύθυνση που θα προκαλέσει την ηλεκτρική σύνδεση και αλληλοεξουδετέρωση των δύο ετεροσήμων φορτίων. Αν οι γραμμές μέγιστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός θα κατευθυνθεί προς αυτό [1].

Η προεκκένωση ξεκινάει από κάποια περιοχή του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό πεδίο θα αποκτήσει πολύ μεγάλες τιμές, της τάξεως των μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι ένας αγωγίμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Έχουμε, κατά συνέπεια, τη δημιουργία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που σε μια διαδικασία ανακύκλωσης συμβάλλει στην προώθησή του προς τη γη. Έτσι, η προεκκένωση, αφού ξεκινήσει, αναπτύσσεται από μόνη της στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, εφόσον τροφοδοτείται από την πλευρά του σύννεφου με μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου.

(Ενδέχεται να υπάρχουν και διακλαδώσεις του αγωγίμου οχετού, οι οποίες, όμως, δεν απολήγουν σε γεφύρωσή του προς τη γη, λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων).

β) Εκκένωση αντίθετης φοράς:

Η διαμήκης πτώση τάσεως κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης διαφέρει στις διάφορες θέσεις του. Έτσι, ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται σαν μια μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο άκρο του προς το έδαφος, είναι πολύ μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για τον ιονισμό του αέρα από κρούσεις (γύρω στα 30kV/cm).

Για αυτό το λόγο, ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα Corona (στεμματοειδούς εκκενώσεως), που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού

είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνει όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει προς το έδαφος. Καθώς τώρα ο οχετός κατέρχεται στη γη, αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της γης. Έτσι, είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα φαινόμενο τύπου Corona, το οποίο καταλήγει σε μια ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχετό, οπότε και έχουμε πλήρη γεφύρωση του διακένου αέρα, δηλαδή κεραυνικό πλήγμα.

Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού για να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως.

γ) *Κύρια εκκένωση:*

Στην τελευταία αυτή φάση, η οποία εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε γεφύρωση της αποστάσεως μεταξύ νέφους και γης. Ήδη προϋπάρχει αγωγίμος οχετός προεκκενώσεως που παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκενώσεως. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα δια μέσου του οχετού είναι της τάξεως των 10-100kA, με κλίσεις μετώπου της τάξεως των 20-100kA/μs, ενώ η διάρκεια ροής των ρευμάτων αυτών είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων μs. Το μήκος του κεραυνικού οχετού εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται το αντίστοιχο καταγιδοφόρο νέφος, ενώ όταν πρόκειται για κεραυνό που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο νεφών, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αντιστοίχων νεφών. Σε περίπτωση που έχουμε κεραυνοπληξία προς γη, το μήκος των κεραυνικών οχετών είναι της τάξεως λίγων χιλιομέτρων το πολύ.

Η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, γιατί από μόνο του το πλάσμα, λόγω του μαγνητικού πεδίου, αποσυμπιέζεται. Η μεγάλη λαμπρότητα του ηλεκτρικού τόξου εξηγεί και το γεγονός ότι ο κεραυνικός οχετός συχνά οδηγεί σε παροδικές θαμβώσεις.

1.1.5. Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων

Σαν πολικότητα εκκενώσεως λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που προκάλεσε την εκκένωση.

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μπορούν να διακριθούν αναλόγως της πολικότητάς των σε:

α) *Θετικές εκκενώσεις*, που αποτελούνται από μία μόνο εκφόρτιση διάρκειας από 0.1 έως 2 ms. Η διάρκεια μετώπου αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 ms, το δε εύρος του ρεύματος εκφορτίσεως 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 και 1 ms. Η διάρκεια μετώπου και το εύρος της πρώτης εκφορτίσεως είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για θετικές εκκενώσεις (διάρκεια μετώπου 10 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 και 1 μs. Η κλίση μετώπου για την πρώτη εκφόρτιση υπερβαίνει τα 20 kA/μs, ενώ για τις επόμενες είναι πολύ μεγαλύτερη (τάξεως 40 kA/μs).

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

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, ανάλογα με την πορεία της προεκκενώσεως διακρίνονται σε:

- α) *Ανερχόμενες*, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το έδαφος και κατευθύνεται προς το νέφος και
- β) *Κατερχόμενες*, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το νέφος.

Σε μέρη επίπεδα, χωρίς ιδιαίτερες προεξοχές, πλειοψηφούν οι κατερχόμενες εκκενώσεις. Αντίθετα ανερχόμενες εκκενώσεις δημιουργούνται εκεί που υπάρχουν υψηλά και αιχμηρά αντικείμενα (π.χ. ένας πυλώνας στην κορυφή ενός βουνού).

1.1.6. 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 σχετικά σπάνια το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο, ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους - γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχτών 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.

1.1.7. Παράμετροι κεραυνού

Μια κεραυνική εκκένωση χαρακτηρίζεται από δύο κατηγορίες παραμέτρων: η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικές με την ιδιοσυστασία της εκκένωσης, τη διάρκεια των ρευμάτων και τα διαστήματα όπου το ρεύμα είναι μηδενικό κατά την εκδήλωση πολλαπλών εκκενώσεων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετιζόμενες με τα κεραυνικά ρεύματα, των οποίων η διάρκεια είναι μικρότερη από λίγα ms. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

α) Η μέγιστη τιμή ρεύματος, η οποία προκαλεί υπερπήδηση μονωτήρων και καταστροφή των μονωτικών υλικών, εξαιτίας της ανύψωσης του δυναμικού του πληγέντος σημείου.

β) Η μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος $\left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$, η οποία 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.

γ) Το μεταφερόμενο φορτίο $\int_0^{\infty} i(t)dt$, το οποίο ευθύνεται για την τοπική τήξη και τη διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

δ) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$, ποσότητα ανάλογη της εκλυόμενης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

1.1.8. Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες

Κεραυνική στάθμη συγκεκριμένου τόπου ονομάζεται το πλήθος των ημερών καταιγίδας που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο τόπο σε ένα χρόνο, ενώ ως μέρα καταιγίδας χαρακτηρίζεται εκείνη κατά τη διάρκεια της οποίας ακούγεται μία τουλάχιστον βροντή.

Ισοκεραυνική καμπύλη ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη.

Από την κεραυνική στάθμη υπολογίζεται η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km^2 που πέφτουν στο έδαφος σε ένα συγκεκριμένο τόπο. Υπάρχουν πολλές μελέτες και

μετρήσεις για την μέτρηση της πυκνότητας των κεραυνών, με σημαντικότερη αυτή του A.J.Eriksson που πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_g = 0.04 \cdot T^{1.25}$$

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

1.1.9.Αποτελέσματα κεραυνού

Τα κυριότερα αποτελέσματα του κεραυνού στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεις συνοψίζονται στα παρακάτω [3]:

α) *Θερμικές επιδράσεις:*

Σύμφωνα με το νόμο του Joule, η εκλυόμενη ενέργεια υπό μορφή θερμότητας κατά τη δίοδο κεραυνού δια μέσω αντιστάσεως R , είναι:

$$W = R \cdot \int i^2(t) dt$$

πράγμα που κάνει προφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη μεγαλύτερης αντίστασης προκαλεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων υπερθερμάνσεων. Συνέπειες αυτού του γεγονότος είναι συντήξεις σε αγωγούς κεραιών και σε λεπτά χαλύβδινα σύρματα.

Από παρατηρήσεις προκύπτει, επίσης, ότι δέντρα και ογκώδεις οικοδομές καταστρέφονται μηχανικώς από την πτώση κεραυνών. Στις περιπτώσεις αυτές, η παραγόμενη θερμότητα δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει πυρκαγιά, είναι όμως αρκετή για να προκαλέσει εξάτμιση της υγρασίας στην περιοχή του ρεύματος του κεραυνού. Λόγω της πυκνότητας του υλικού, ο παραγόμενος ατμός δεν μπορεί να απαχθεί στην ατμόσφαιρα, οπότε διαστέλλεται βίαια και προκαλεί διάρρηξη του δέντρου ή του τοίχου.

β) *Υπερπήδηση κεραυνού:*

Η υπερπήδηση κεραυνού παρουσιάζεται λόγω της μεγάλης πτώσης τάσεως κατά τη διάβαση του κεραυνού προς τη γη και κατά τη διέλευση του κεραυνού μέσω αγωγού μεγάλης αυτεπαγωγής, λόγω αδράνειας της ταχύτητας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

γ) *Ακουστικές επιδράσεις:*

Κατά την διάρκεια του κεραυνού αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική δράση (δυνάμεις), με αποτέλεσμα ο μανδύας αέρα, που περιβάλλει τον οχετό, να συμπιέζεται. Η ηλεκτροδυναμική υπερπίεση είναι περίπου 2-3 ατμόσφαιρες. Με το που εξασθενίζει το

κεραυνικό ρεύμα, εξασθενίζει και η υπερπίεση και έτσι ο θερμός πυρήνας του κεραυνού εκρήγνυται και προκαλεί βροντή.

δ) *Χημικά αποτελέσματα:*

Κατά τη διέλευση του κεραυνού μέσα από τον αέρα, τα μέταλλα και το έδαφος, έχουμε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιων χημικών φαινομένων. Στον αέρα σχηματίζονται όζον και νιτρώδη ή νιτρικά οξέα, τα οποία χρησιμεύουν στον εμπλουτισμό του λιπάσματος του εδάφους. Όταν ο κεραυνός διέλθει μέσα από μέταλλο, όπως για παράδειγμα διαμέσου του αγωγού του αλεξικεραυνού, δημιουργείται τοπική θέρμανση που προσβάλλει την επιφάνεια και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για αυξημένη διάβρωση (χωρίς, βέβαια, να σημαίνει ότι το αλεξικέραυνο καθίσταται άχρηστο). Τέλος, στη θέση διαβάσεως από τον αγωγό στο έδαφος, μπορούν να συμβούν χημικές διεργασίες, προκαλούμενες από ηλεκτρολυτικά υλικά που βρίσκονται στο έδαφος.

1.2.Εσωτερικές υπερτάσεις

Οι εσωτερικές υπερτάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο καθορίζονται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τη δομή και τον τρόπο της εκμετάλλευσής του. Οι εσωτερικές υπερτάσεις επιβάλλονται και στον εξοπλισμό εισόδου των υποσταθμών, επειδή δε τυχόν εσωτερικό σφάλμα ή έρπουσα εκκένωση στον εξοπλισμό αυτό δημιουργεί πολύ σοβαρότερα προβλήματα από ότι τα σφάλματα στη γραμμή μεταφοράς, είναι προφανές ότι η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς δεν πρέπει να είναι ανώτερη από τη μόνωση του εξοπλισμού του υποσταθμού. Αντιθέτως, μέσω της μείωσης της μόνωσης μιας γραμμής μεταφοράς είναι δυνατόν να αυξηθεί η προστασία του εξοπλισμού του υποσταθμού [4].

Οι εσωτερικές υπερτάσεις διακρίνονται σε δυναμικές και χειρισμού ανάλογα με το μηχανισμό γενέσεώς τους, τη διάρκεια και το μέγεθός τους. Οι δυναμικές υπερτάσεις περιλαμβάνουν:

- Την ηλέκτριση ανοικτής γραμμής,
- Το σφάλμα γης και
- Το φαινόμενο συντονισμού.

Κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο ενός διακόπτη και την κατά συνέπεια αλλαγή της συνδεσμολογίας ενός δικτύου διαδίδονται σ' αυτό υπερτάσεις με σύνθετη κυματομορφή, οι οποίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου και του διενεργούντος τον χειρισμό

διακόπτη, είναι δυνατόν να φτάσουν σε πολύ υψηλές τιμές. Αυτού του είδους οι υπερτάσεις είναι οι υπερτάσεις χειρισμού και εμφανίζονται κατά:

- Τη διακοπή ρευμάτων βραχυκυκλώματος,
- Τη διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων,
- Τη διακοπή χωρητικών ρευμάτων,
- Τη ζεύξη, απόζευξη και επανάζευξη ανοικτών γραμμών και
- Τον ετεροχρονισμό φάσεων κατά τη ζεύξη επαγωγικών φορτίων.

1.3.Βιβλιογραφία

[1] R.H. Golde, “Lightning – Physics of lightning”, vol.1, pp.85-89, Academic Press, London, 1977.

[2] Ι.Α. Σταθόπουλος, “Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.

[3] Π. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Αθήνα 1994

[4] Ευαγ. Λεκατσάς, “Θέματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Αθήνα 1985

Κεφάλαιο 2

Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης

2.1.Εισαγωγή

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς και διανομής και των υποσταθμών από υπερτάσεις. Είναι συσκευές, οι οποίες επιτρέπουν τη δίοδο του ηλεκτρισμού προς τη γη σε περιπτώσεις υπέρτασης, ενώ στην κανονική λειτουργία δεν άγουν σχεδόν καθόλου. Τα αλεξικέραυνα μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν διακόπτες, οι οποίοι κλείνουν στιγμιαίως σε περίπτωση υπέρτασης και δημιουργούν μια αγώγιμη δίοδο προς τη γη, διοχετεύοντας την υπέρταση μακριά από τις προς προστασία συσκευές. Βασικές, λοιπόν, ιδιότητες ενός αλεξικέραυνου είναι [1,2]:

- Να μην άγει κατά την κανονική τάση λειτουργίας (στην πραγματικότητα υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής της τάξεως του 1mA),
- Να αρχίσει να άγει μόλις εμφανισθεί μια υπέρταση και
- Να διακόπτει αμέσως τη λειτουργία του μόλις παρέλθει η υπέρταση.

2.2.Είδη αλεξικέραυνων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλεξικέραυνων (με ή χωρίς διάκενα), οι οποίοι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο: παρουσιάζουν, δηλαδή μεγάλη αντίσταση της τάξης των $M\Omega$ σε κανονική λειτουργία, ενώ σε περίπτωση υπέρτασης η αντίσταση μειώνεται σε μερικά Ω . Παλαιότερα, αλεξικέραυνα με διάκενα σε σειρά με μη γραμμικές αντιστάσεις ήταν ευρέως διαδεδομένα, σήμερα, όμως, δίνουν τη θέση τους σε αλεξικέραυνα χωρίς

διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO).

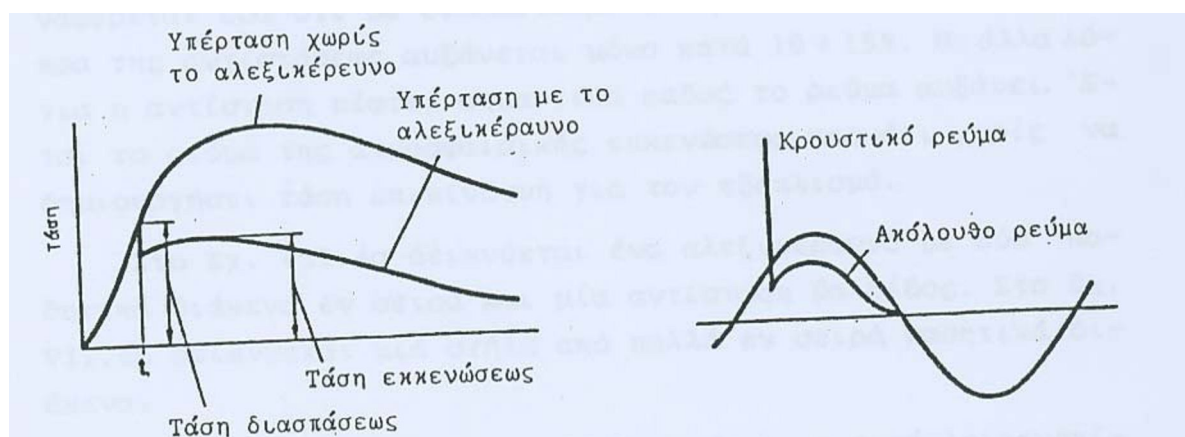
2.2.1. Αλεξικέραυνα με διάκενα

Αυτού του τύπου τα αλεξικέραυνα αποτελούνται από μια σειρά διακένων σε σειρά με μια μη γραμμική αντίσταση, περικλειόμενα σε κατάλληλο μονωτικό περίβλημα. Τα διάκενα -τα οποία πρέπει να έχουν όσο γίνεται περισσότερο ομοιογενές πεδίο, ούτως ώστε η τάση διάσπασής τους να είναι ανεξάρτητη από την κλίση του μετώπου της κρουστικής τάσης – διασπώνται, όταν η υπέρταση υπερβεί μια ορισμένη τιμή, συνδέοντας τον αγωγό υψηλής τάσης με τη γη. Μόλις παρέλθει η υπέρταση, το τόξο δεν μπορεί να συντηρηθεί υπό την κανονική τάση λειτουργίας λόγω της μη γραμμικής αντίστασης. Οι μη γραμμικές αντιστάσεις στα αλεξικέραυνα με διάκενα είναι συνήθως από ανθρακοπυρίτιο (SiC), ενώ η χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος, που εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του υλικού, το συνεκτικό υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους, είναι της μορφής:

$$I = k \cdot U^a$$

όπου k και a είναι συντελεστές.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλεξικέραυνου, όταν φθάσει σε αυτό μια υπέρταση. Μετά τη διάσπαση των διακένων, το ακόλουθο ρεύμα περιορίζεται από τις μη γραμμικές αντιστάσεις, ώστε μόλις η τιμή του γίνει μηδενική να διακόπτεται [1-4].



Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας αλεξικέραυνου και διακοπή ακόλουθου ρεύματος

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αλεξικέραυνων είναι τα ακόλουθα [5]:

α. Ονομαστική τάση: Είναι η μέγιστη τάση (rms) στη συχνότητα λειτουργίας του αλεξικέραυνου, στην οποία το αλεξικέραυνο μπορεί να διακόψει με βεβαιότητα το ακόλουθο ρεύμα. Η τάση αυτή πρέπει, αν μείνει μονίμως στα άκρα του αλεξικέραυνου, να μην επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του.

β. Κρουστική Τάση Διασπάσεως

- **Μετωπική:** Είναι η τάση διασπάσεως του αλεξικέραυνου, που συμβαίνει στο μέτωπο του κρουστικού κύματος (δηλαδή προ της κορυφής). Η κλίση του μετώπου κατά IEC είναι 100kV/μsec για κάθε 12kV της ονομαστικής τάσης του αλεξικέραυνου, αλλά όχι παραπάνω από 1200kV/μsec (π.χ. για 21kV, η κλίση είναι $21/12100 = 175\text{kV}/\mu\text{sec}$).
- **Κρουστική 100%:** Είναι η κορυφή της ελάχιστης τάσης κρουστικού κύματος ορισμένης μορφής (κατά IEC 1.2/50μsec), για την οποία όσες φορές κι αν επιβληθεί, έχουμε διάσπαση του αλεξικέραυνου.
- **Κρουστική 50% (κρίσιμη):** Είναι η κορυφή της τάσης κρουστικού κύματος (1.2/50μsec) που, όταν επιβληθεί επανειλημμένως, θα προκαλέσει διάσπαση του αλεξικέραυνου στο 50% των περιπτώσεων.

Για κάθε σημείο της καμπύλης τάσης διάσπασης του αλεξικέραυνου-χρόνου (βλέπε Σχήμα 2.4), τετμημένη είναι η διάρκεια από την αρχή της επιβολής της τάσης μέχρι της διάσπασης του αλεξικέραυνου και τεταγμένη η τάση διάσπασης προκειμένου για μετωπική διάσπαση ή η κορυφή της τάσης που επιβάλλεται προκειμένου για διάσπαση στη ουρά του κύματος.

γ. Τάση εκκενώσεως ή παραμένουσα τάση: Είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του αλεξικέραυνου μετά τη διάσπασή του, κατά τη διάρκεια της εκκενώσεως του ρεύματος (μορφής 8/20μsec).

δ. Τάση διάσπασης Β.Σ. (50 Hz): Είναι η ενδεικνυμένη τιμή της ελαχίστης τάσης Β.Σ. που προκαλεί διάσπαση του αλεξικέραυνου, όταν και όσες φορές κι αν επιβληθεί στα άκρα του.

ε. Ρεύμα εκκενώσεως: Το κρουστικό ρεύμα που διέρχεται από το αλεξικέραυνο κατά την εκκένωσή του.

ζ. Ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως: Το ρεύμα εκκενώσεως ορισμένης μορφής ($8/20\mu\text{sec}$), που μπορεί να εκκενώσει το αλεξικέραυνο, χωρίς η τάση στα άκρα του να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση εκκενώσεως (παραμένουσα).

Η ένταση αυτή ορίζει την κλάση του αλεξικέραυνου. Το αλεξικέραυνο πρέπει να μπορεί να εκκενώνει το ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως, σε αριθμό (φορές) και συχνότητα, που ορίζονται από την προδιαγραφή του.

στ. Κρουστικό ρεύμα εκκενώσεως: Είναι η μέγιστη τιμή (κορυφή) κρουστικού ρεύματος μορφής $4/10\mu\text{sec}$, που μπορεί να εκκενώνει το αλεξικέραυνο.

η. Ακόλουθο ρεύμα: Το ρεύμα 50Hz που διέρχεται από το αλεξικέραυνο μετά την εκκένωση του κρουστικού ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τύποι διακένων: Τα συμβατικά ή παθητικά διάκενα και τα ενεργητικά διάκενα.

Ένα συγκρότημα με παθητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια χωρισμένα με τα τεμάχια στεατίτου και με μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στα διάκενα αυτά υπάρχει, επίσης, μία διάταξη προϊόντισμού, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένη στάθμη τάσης διάσπασης (χωρίς δηλαδή μεγάλη διασπορά) και χαμηλή στάθμη προστασίας. Σκοπός των αντιστάσεων κατανομής (grading resistors) είναι η ομοιόμορφη κατανομή της τάσης κατά μήκος των διακένων κατά τη διάρκεια σχετικώς βραδέως μεταβαλλόμενων υπερτάσεων. Για ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις την ομοιόμορφη κατανομή εξασφαλίζουν πυκνωτές κατανομής (grading capacitors) παράλληλοι προς τις αντιστάσεις αυτές και τα διάκενα. Έτσι, η τάση διάσπασης στην βιομηχανική συχνότητα και σε υπερτάσεις χειρισμών εξαρτάται κυρίως από τις αντιστάσεις κατανομής, ενώ η τάση διάσπασης σε ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις ατμοσφαιρικής προελεύσεως εξαρτάται από τις χωρητικότητες κατανομής του αλεξικέραυνου [1-6].

Ένα συγκρότημα με ενεργητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια στερεωμένα πάνω σε μονωτικούς δίσκους, οι οποίοι φέρνουν και αντίσταση στο τόξο. Εν σειρά με τα ηλεκτρόδια αυτά και τους δίσκους υπάρχει ένα πηνίο, το οποίο δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο με την βοήθεια του οποίου το τόξο μετακινείται προς ένα στενό θάλαμο σβέσεως, όπου και επιμηκύνεται περίπου 100 φορές. Η επιμήκυνση αυτή του τόξου δημιουργεί μεγάλη πτώση τάσης κατά μήκος των διακένων και βελτίωση στις συνθήκες

εκκαθαρίσεως του ακόλουθου ρεύματος. Έτσι, τα κυριότερα προσόντα των αλεξικέραυνων με ενεργά διάκενα είναι:

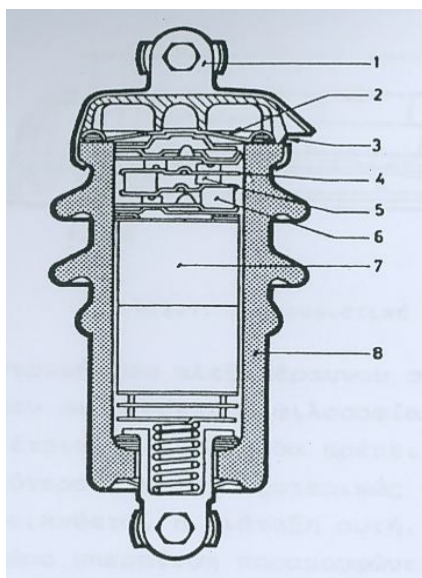
- Καλύτερη προστασία χωρίς να έχουμε σημαντική αύξηση της ισχύος του ακόλουθου ρεύματος,
- Καλύτερη δυνατότητα σφραγίσεως και
- Δυνατότητα απορροφήσεως μεγαλύτερης διάρκειας εκκενώσεως.

Τα αλεξικέραυνα με ενεργά διάκενα χρησιμοποιούνται για δίκτυο ονομαστικών τάσεων μεγαλύτερων από 200kV, για τα οποία οι σχετικές στάθμες μόνωσης είναι χαμηλές και η στάθμη προστασίας σε υπερτάσεις χειρισμών είναι επίσης χαμηλή [1-6].

Εκτός από τις μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής της τάσης που βρίσκονται παράλληλα με κάθε διάκενο έχουμε και εν σειρά με τα διάκενα μία μη γραμμική αντίσταση (είτε μία ανά διάκενο, είτε μία συνολική για όλο το αλεξικέραυνο) από ανθρακούχο πυρίτιο SiC. Η αντίσταση αυτή, που καλείται και αντίσταση βαλβίδος, εξαρτάται από την τάση. Έτσι, τυπικά αναφέρεται εδώ ότι με διπλασιασμό του ρεύματος, η τάση στα άκρα της αντίστασης αυξάνεται μόνο κατά 10-15%. Με άλλα λόγια, η αντίσταση πέφτει σημαντικά, ενώ το ρεύμα αυξάνει. Έτσι, το ρεύμα της ατμοσφαιρικής εκκενώσεως περνάει χωρίς να δημιουργήσει τάση επικίνδυνη για τον εξοπλισμό [1-6].

Σε μία λίγο διαφορετική κατασκευή δεν υπάρχει πηνίο για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου που θα επιμηκύνει το τόξο, αλλά η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων είναι τέτοια, ώστε το ίδιο το ρεύμα του τόξου να δημιουργεί το απαραίτητο για το σκοπό αυτόν μαγνητικό πεδίο [1-6].

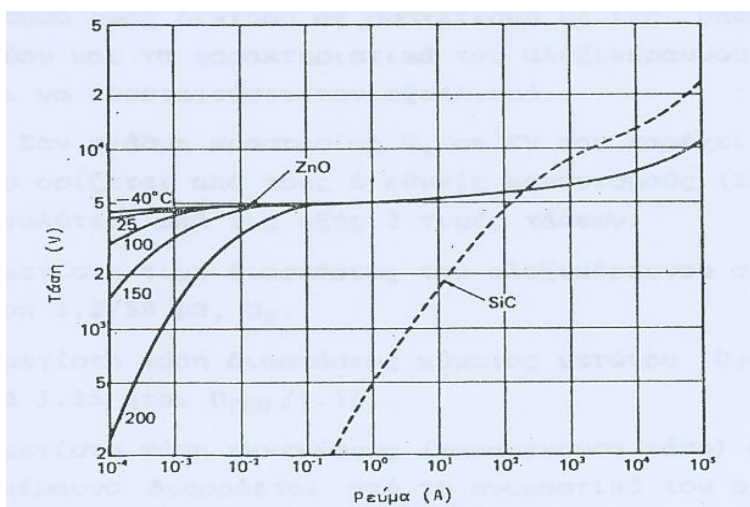
Τα περισσότερα αλεξικέραυνα έχουν μία ανακουφιστική διάταξη πίεσεως (pressure relief arrangement), με την οποία αποφεύγεται η βίαιη καταστροφή τους σε περίπτωση που το αλεξικέραυνο δεν σφραγίζει. Η φιλοσοφία της διάταξης αυτής είναι, ότι σε μία τέτοια περίπτωση, θα πρέπει η διάσπαση να μεταφέρεται το ταχύτερο δυνατόν εκτός του αλεξικέραυνου. Η δημιουργούμενη στον εσωτερικό χώρο υπερπίεση παραμορφώνει τον δίσκο και έτσι τα ιονισμένα αέρια εξέρχονται προκαλώντας εξωτερική διάσπαση λόγω του ιονισμού τους [1].



Σχήμα 2.2: Αλεξικέρανο με παθητικά διάκενα και αντίσταση βαλβίδας

(1. Ανω βραχίονας, 2. Διάφραγμα και ανακουφιστική διάταξη υπερπίεσης, 3. Άνοιγμα διαφυγής αερίων, 4. Ηλεκτρόδιο διακένου, 5. Διαχωριστικό στεατίου, 6, 7. Αντίσταση βαλβίδας, 8. Πορσελάνη)

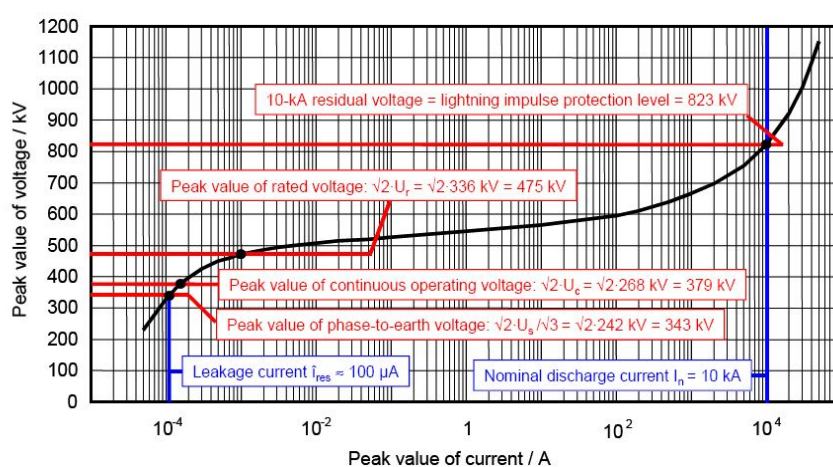
Εκτός από το ανθρακούχο πυρίτιο (SiC) που χρησιμοποιείται πάνω από 25 χρόνια σαν το βασικό υλικό για τις μη γραμμικές αντιστάσεις των αλεξικέρανων, χρησιμοποιήθηκε κατά την δεκαετία 1970-80 και το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), το οποίο σε σύγκριση με το SiC παρουσιάζει πολύ πιο έντονη μη γραμμικότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3. Τα αλεξικέρανα με ZnO έχουν χαμηλότερη και ακριβέστερα προσδιορισμένη στάθμη προστασίας και για το λόγο αυτό έχουν αντικαταστήσει τα αλεξικέρανα με SiC.



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές τάσης - ρεύματος

2.2.2.Αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα

Τα τελευταία χρόνια, τα αλεξικέραυνα με διάκενα αντικαθίστανται με αυτά χωρίς διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις κατασκευασμένες από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), το οποίο συνιστά σημαντική βελτίωση έναντι του SiC, καθώς η χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος είναι σχεδόν επίπεδη και μη γραμμική και καλύπτει περίπου 8 δεκάδες (Σχήμα 2.4). Αυτή ακριβώς η έντονη μη γραμμικότητα είναι αυτή που καθιστά την κατασκευή αλεξικέραυνου χωρίς διάκενα [4].



Σχήμα 2.4 Χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος ενός αλεξικεραύνου χωρίς διάκενα [8]

Σε τάση κανονικής λειτουργίας το ρεύμα διαρροής περιορίζεται σε κάποια mA, ενώ μπορεί να διακόπτει κρουστικές τάσεις με ρεύματα πολλών kA. Το ρεύμα που ρέει δια της μη γραμμικής αντίστασης είναι αμελητέο για κάθε τάση μικρότερη μιας ορισμένη τιμής V_1 (που μπορεί να είναι η κανονική τάση λειτουργίας του δικτύου), εάν όμως εμφανιστεί στα άκρα του αλεξικέραυνου μια τάση μεγαλύτερη με αναμενόμενο εύρος, τιμής υψηλότερο μιας τιμής $V_m > V_1$, ρέει δια αυτού μεγάλο ρεύμα, έτσι ώστε η τάση να περιορισθεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες στην τιμή V_m [4,7-8].

Τα πλεονεκτήματα των αλεξικέραυνων αυτών είναι η απλή τους κατασκευή, η μη γραμμική σχέση τάσης ρεύματος για μια μεγάλη περιοχή τιμών, καθώς και η απουσία διακένων, τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν πολύ απότομο μέτωπο μείωσης της τάσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία επικίνδυνων καταπονήσεων. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η συνεχής ροή ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας και κατά συνέπεια η απώλεια ισχύος.

Η μη γραμμική αντίσταση συνίσταται από ZnO με μικρές προσμίξεις και άλλων οξειδίων, όπως Bi₂O₃, MnO, Cr₃O₃ και Sb₂O₃. Οι πρώτες κατασκευές από οξειδίο του ψευδαργύρου τοποθετούνταν σε κεραμικό περίβλημα, όπου τα στοιχεία του βαρίστορ περιβάλλονταν από μονωτικό αέριο και οι καταλήξεις τους σφραγίζονταν με δακτυλίους από καουτσούκ. Με την πάροδο του χρόνου, όμως, οι δακτύλιοι φθείρονταν με αποτέλεσμα την είσοδο υγρασίας σε όλη την κατασκευή. Κατά τη δεκαετία του '80 άρχισαν να χρησιμοποιούνται περιβλήματα από πολυμερή υλικά (όπως το καουτσούκ σιλικόνης). Τέτοια υλικά, τα οποία είναι κατάλληλα και για περιοχές με μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση, προσφέρουν ελαφρύτερες κατασκευές, βελτιωμένη μηχανική αντοχή και αύξηση της τάσης υπερπήδησης σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη ρύπανση [4].

Τα κυριότερα μεγέθη που ενδιαφέρουν σε ένα αλεξικέραυνο είναι [9]:

α. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Operating Voltage-Uc): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης που μπορεί να εφαρμόζεται διαρκώς στα άκρα του αλεξικέραυνου. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κανονική τάση του δικτύου ($U_c = 1.05-1.1U$).

β. Ονομαστική τάση (Rated Voltage-Ur): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του αλεξικέραυνου, για την οποία το αλεξικέραυνο συνεχίζει να λειτουργεί σωστά για προσωρινές υπερτάσεις (10-100sec). Η ονομαστική τάση είναι 1.25 φορές η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας: $U_r = 1.25U_c$.

γ. Παραμένουσα τάση (Ures): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου κατά την εφαρμογή κρουστικών ρευμάτων.

δ. Βασική κρουστική τάση μονώσεως (Lightning Impulse Protective Level): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου, όταν διέρχεται δι' αυτού το ονομαστικό ρεύμα εκφορτίσεως.

ε. Ενέργεια αντοχής (Thermal energy absorption capability): Είναι η μέγιστη τιμή της ενέργειας της εγχυόμενης στο αλεξικέραυνο, μετά την οποία το αλεξικέραυνο επανέρχεται στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας.

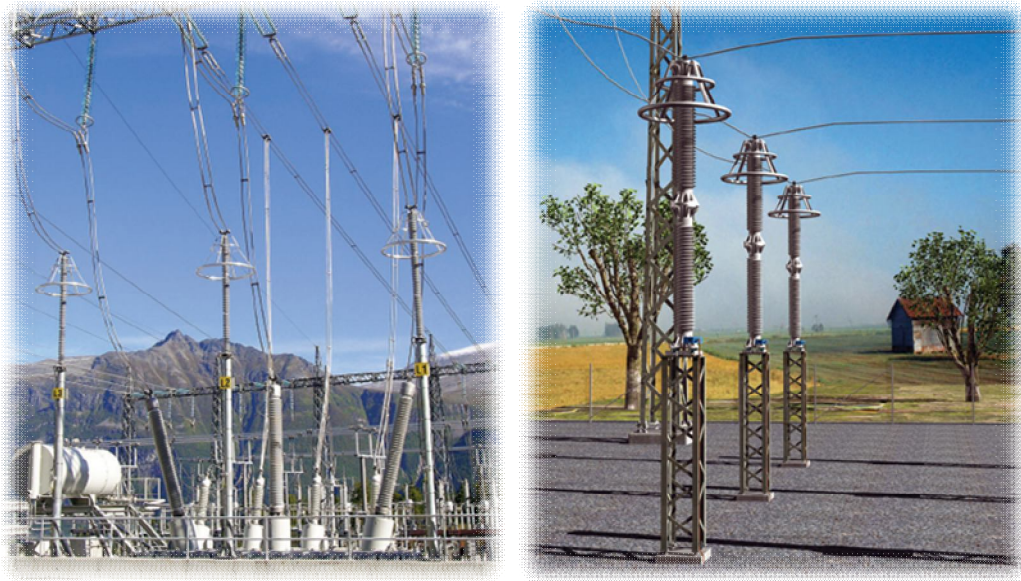
Στο Σχήμα 2.5 και 2.6 φαίνεται η τομή ενός αλεξικέραυνου, βασικά στοιχεία του οποίου είναι η μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ) από οξειδία του ψευδαργύρου, το μονωτικό περίβλημα από πολυμερές υλικό, ένα ενδιάμεσο υαλώδες υλικό και τα ηλεκτρόδια σύνδεσης με την υψηλή τάση και τη γη. Λόγω της ανομοιομορφίας του δυναμικού στο εσωτερικό του βαρίστορ (η οποία καταπονεί θερμικά το τμήμα του βαρίστορ που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης) τοποθετούνται, ιδίως στα αλεξικέραυνα 150kV και 400kV, κατάλληλα τοροειδή (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5: Τομή αλεξικέραυνου [10]



Σχήμα 2.6: Τομή αλεξικέραυνου [7]

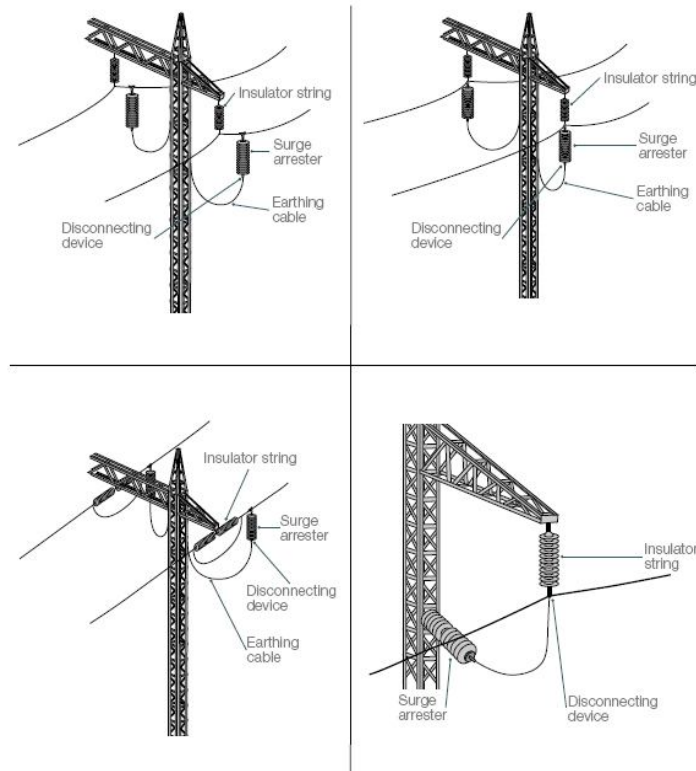


Σχήμα 2.7: Αλεξικέραυνα 400kV και 150kV με τοροειδή [7]

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών υψηλής και μέσης τάσης, καθώς και των μετασχηματιστών, τόσο για απευθείας όσο και για επαγόμενα κεραυνικά πλήγματα. Τοποθετούνται μεταξύ φάσης και γης (Σχήμα 2.8,2.9), και είναι ιδιαίτερα αναγκαία στην περίπτωση υψηλών αντιστάσεων γείωσης.



Σχήμα 2.8: Αλεξικέραυνα σε γραμμή μεταφοράς [7]



Σχήμα 2.9: Τρόποι τοποθέτησης αλεξικέρανων σε πυλώνες γραμμών μεταφοράς [8]

Ο εξοπλισμός που συνοδεύει συνήθως τα αλεξικέρανα είναι ο μετρητής υπερτάσεων, η συσκευή αποσύνδεσης και ο μετρητής του ρεύματος διαρροής. Οι μετρητές υπερτάσεων (Σχήμα 2.10) συνδέονται εν σειρά με το αλεξικέρανο και καταγράφουν – με ηλεκτρομηχανικό ή ηλεκτρονικό τρόπο - πόσες φορές λειτούργησε το αλεξικέρανο.



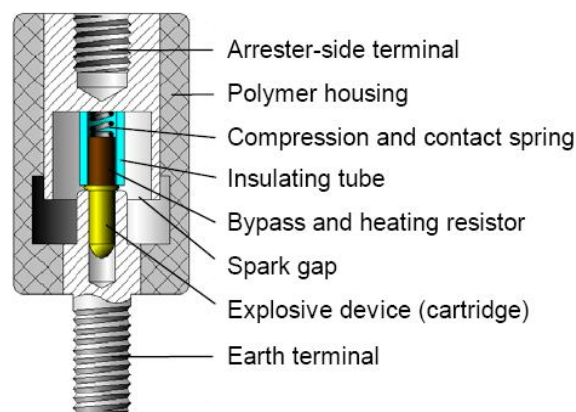
Σχήμα 2.10: Μετρητής Υπερτάσεων [7]

Ο μετρητής του ρεύματος διαρροής συνδέεται σε σειρά με το αλεξικέραυνο και μετράει το ολικό ρεύμα διαρροής. Η ένδειξη αυτή ωστόσο δεν έχει μεγάλη πρακτική αξία, αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής.



Σχήμα 2.11: Μετρητής ρεύματος διαρροής [8]

Η συσκευή αποσύνδεσης (Σχήμα 2.12) αποσυνδέει το αλεξικέραυνο από το σύστημα σε περίπτωση υπερφόρτισης ή πιθανής καταστροφής του. Σε αυτήν την περίπτωση, η γραμμή μένει απροστάτευτη από υπερτάσεις. Τυπική αρχή λειτουργίας της συσκευής αποσύνδεσης είναι ένας εκρηκτικός μηχανισμός ενεργοποιούμενος από το ρεύμα διαρροής.



Σχήμα 2.12: Συσκευή αποσύνδεσης [8]

Τα αλεξικέραυνα έχουν μεγάλη σημασία στην καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής, γι' αυτό θα πρέπει να είναι σε καλή κατάσταση και να λειτουργούν αξιόπιστα, τόσο υπό κανονικές συνθήκες, όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα. Οι πιο συνηθισμένες αστοχίες σε αλεξικέραυνα όλων των τύπων είναι [11]:

- Εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του αλεξικέραυνου
- Μερικές εκκενώσεις στο εσωτερικό, εξαιτίας κακής επαφής μεταξύ των δίσκων του βαρίστορ
- Καταστροφή ή ρύπανση του εξωτερικού περιβλήματος
- Μηχανικές – θερμικές καταπονήσεις και καταστροφή ή αλλοίωση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος μετά από διέλευση ισχυρού ρεύματος.

Είναι φανερό ότι απαιτείται συχνή οπτική επιθεώρηση και διεξαγωγή κατάλληλων δοκιμών για τον έλεγχο της κατάστασης των αλεξικέραυνων, εάν δηλαδή μπορούν να λειτουργούν και προστατεύουν αποτελεσματικά τη γραμμή σε περίπτωση υπέρτασης. Οι δοκιμές και οι έλεγχοι που προβλέπονται για τα αλεξικέραυνα μελετώνται στα οικεία κεφάλαια.

2.3.Βιβλιογραφία

- [1] Ε. Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985
- [2] Κ. Α. Στασινόπουλος, «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Α' Έκδοση, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1996
- [3] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών
- [4] Μιχ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδ. Οικονομικών, Αθήνα 2005
- [5] Οδηγία Διανομής Νο 23 «Προστασία Δικτύων ΜΤ από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις». ΔΕΗ, Γραφείο βοηθού Γενικού Διευθυντή Διανομής, Εκδ.01/06/1988
- [6] Α. Παπαθανασίου, «Ηλεκτρικά Δίκτυα, Τόμος Α: Εναέρια Δίκτυα», Σημ. για τη Σιβιτανίδειο Σχολή, Αθήνα

- [7] ABB Buyer's Guide, "High Voltage Surge Arresters", Edition 5.1, 2004-2007
- [8] V. Hinrichsen, "Metal-Oxide Surge Arresters", Siemens, 1st Edition, 2001
- [9] IEC 60099-4, "Surge Arresters: Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", second edition, 2004-2005
- [10] Διαφημιστικό έντυπο της Tyco Electronics
- [11] R.E. James, Q.Su, "Condition Assessment of high Voltage Insulation in Power System Equipment", IET Power and Energy Series 53, 1st Edition 2008

Κεφάλαιο 3

Γραμμές μεταφοράς

3.1.Εισαγωγή στις γραμμές μεταφοράς

3.1.1.Εισαγωγή

Οι γραμμές μεταφοράς μαζί με τους υποσταθμούς και το τελικό σύστημα διανομής συνθέτουν το σύστημα μεταφοράς. Αποτελούν βασικό στοιχείο για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές και ο ρόλος τους είναι πολύ σημαντικός, γιατί ένα σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις, έτσι ώστε η λειτουργία του να θεωρείται επιτυχής [1].

Οι προϋποθέσεις αυτές είναι οι εξής:

1. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή, ή σχεδόν σταθερή τάση, και οι τάσεις των φάσεων να βρίσκονται σε ισορροπία.
2. Το κύμα της τάσεως πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή.
3. Η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή, η οποία συνεπάγεται ελάχιστο κόστος μεταφοράς.
4. Τέλος, η επίδραση του συστήματος μεταφοράς στις εγκαταστάσεις άλλων κοινοφελών επιχειρήσεων, όπως των τηλεφωνικών, τηλεγραφικών ή ραδιοφωνικών, προκαλούμενη από ηλεκτρικές ή μαγνητικές παρεμβολές, θα πρέπει να περιορίζεται μεταξύ αποδεκτών ορίων

Η μελέτη, λοιπόν, των ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή προβλημάτων στην εκπλήρωση των παραπάνω προϋποθέσεων.

Σε αντίθεση με τις γραμμές μεταφοράς, οι οποίες μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, οι γραμμές διανομής μεταφέρουν μικρότερες ποσότητες ισχύος και συμβάλλουν στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (βιομηχανίες, κατοικίες κλπ.)

3.1.2.Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής στην Ελλάδα

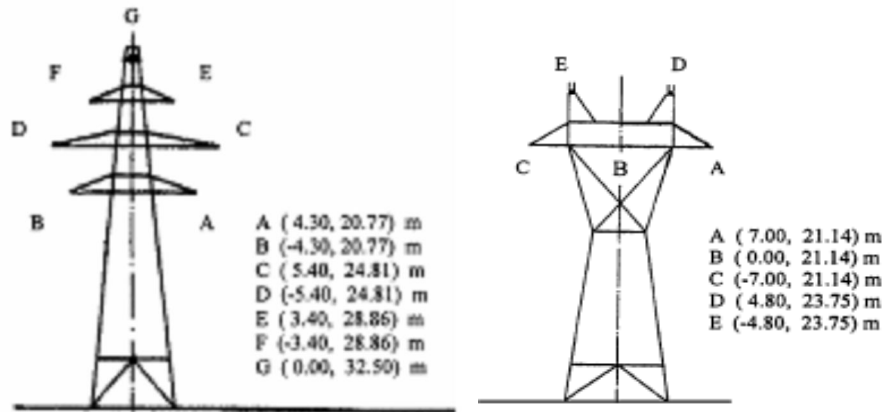
Σύμφωνα με το Ελληνικό Σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς-Διανομής, το σύστημα των γραμμών μεταφοράς αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, 150kV και 66kV, και υπερυψηλής τάσης 400kV. Τόσο οι γραμμές υψηλής τάσης, όσο και οι γραμμές υπερυψηλής τάσης διαχωρίζονται σε ελαφρύ και βαρύ τύπου, όπως επίσης και σε μονού ή διπλού κυκλώματος. Όπου είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελεύσεως, όπως σε περιπτώσεις ορεινού χαρακτήρος του εδάφους ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς, εις βάρος, όμως, της αξιοπιστίας αυτής, χρησιμοποιούνται γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, στις οποίες δύο ανεξάρτητα κυκλώματα φέρονται σε κοινούς πυλώνες. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται ευρύτατα στα δίκτυα μεταφοράς 150kV και 400kV του ελληνικού συστήματος.

Όσων αναφορά τις γραμμές διανομής, αυτές τροφοδοτούν τους καταναλωτές μέσης τάσης, 15 με 20kV, και τους καταναλωτές χαμηλής τάσης 220/330V.

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

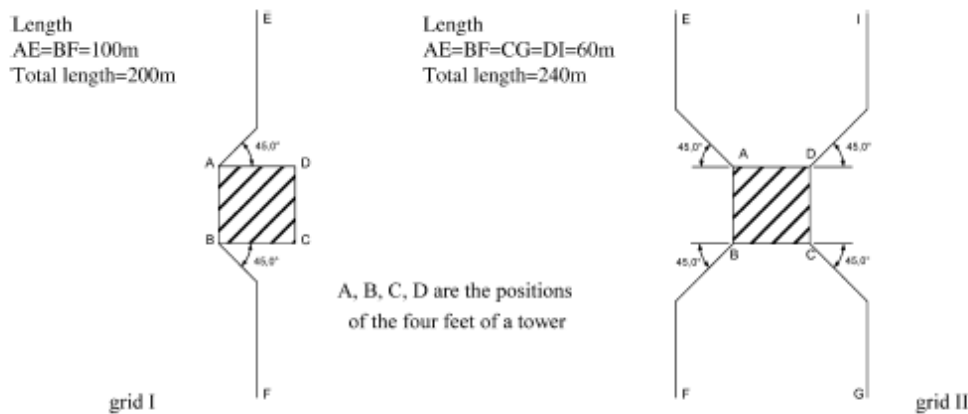
Η Δ.Ε.Η. σχεδιάζει τις γραμμές μεταφοράς των 150kV να έχουν μέγιστη τάση αντοχής ίση με 750kV, ενώ η μέγιστη τάση αντοχής που προβλέπεται για τις γραμμές μεταφοράς των 400kV είναι τα 1550kV [2].

Οι τύποι των πυλώνων που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. για γραμμές μεταφοράς 150kV φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 3.1: Τύποι πυλώνων του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς της Δ.Ε.Η.

Η Δ.Ε.Η. χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά πλέγματα συστημάτων γείωσης των πυλώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η χρήση των πλεγμάτων αυτών εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους, με το πλέγμα I να χρησιμοποιείται, όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει χαμηλές τιμές και το πλέγμα II να χρησιμοποιείται, όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει υψηλές τιμές.



Σχήμα 3.2: Τύποι πλεγμάτων των συστημάτων γείωσης των πυλώνων

3.2. Κατηγοριοποίηση των γραμμών μεταφοράς

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν το μέσο για την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος και λειτουργούν υπό υψηλές τάσεις. Επομένως, αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή. Για την αποφυγή ατυχημάτων, καθώς επίσης και για τον περιορισμό της επίδρασης σε άλλες κανονικές δραστηριότητες του

περιβάλλοντος, υπάρχουν τρεις λύσεις, οι οποίες αποτελούν και ένα τρόπο διαχωρισμού των γραμμών μεταφοράς [3]:

1. Χρήση εναέριων γραμμών, δηλαδή διέλευση των αγωγών επάνω από το έδαφος σε ασφαλές ύψος,
2. Χρήση υπόγειων γραμμών, δηλαδή με την διαδρομή των αγωγών εντός του εδάφους και τέλος,
3. Χρήση κατάλληλου περιβλήματος στους αγωγούς.

Σχετικά με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, η πρώτη απαίτηση είναι μία κατάλληλη ζώνη εδάφους για την διέλευσή της, εκτεινόμενη κατά μήκος όλης της διαδρομής της. Ενώ τόσο οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, όσο και πολλές γραμμές διανομής μέσης τάσης οδεύουν, συνήθως, κατά μήκος των οδών και των λεωφόρων, για την διέλευση των γραμμών μεταφορά υψηλής τάσης χρειάζεται ευρύτερος και ξεχωριστός διάδρομος εδάφους από ότι είναι δυνατό να διατεθεί στις πλευρές των οδών και των αρτηριών. Οι αγωγοί των εναέριων γραμμών στηρίζονται σε φορείς που ονομάζονται στύλοι ή πυλώνες. Στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, οι φορείς είναι συνήθως ξύλινοι στύλοι με εγκάρσιους βραχίονες κοντά στην κορυφή για την στήριξη των αγωγών. Για υψηλότερες τάσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί παρόμοιος τύπος στύλου, αλλά με μεγαλύτερους βραχίονες, για την τήρηση μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ των αγωγών. Για ακόμη υψηλότερες τάσεις χρησιμοποιούνται συνθετότερες ξύλινες κατασκευές, χαλύβδινοι στύλοι ή χαλύβδινοι πυλώνες. Οι αγωγοί των γραμμών αναρτώνται στους πυλώνες μέσω των μονωτήρων αναρτήσεως, οι οποίοι παρέχουν και την απαιτούμενη μόνωση των αγωγών έναντι των μεταλλικών μερών των πυλώνων. Οι μονωτήρες αναρτήσεως είναι κατασκευασμένοι από πορσελάνη ή γυαλί.

Σχετικά με τις υπόγειες γραμμές, αυτές είναι πολύ δαπανηρότερες από τις εναέριες, και γι' αυτό χρησιμοποιούνται μόνο μέσα στις πόλεις, όπου η αξία της γης είναι υψηλή ή όπου άλλοι ειδικοί λόγοι, όπως οι αισθητικοί, ασφάλειας ή δυσχέρειες στην εξεύρεση ζωνών διελεύσεως καθιστούν ανεπιθύμητη ή και ανέφικτη την μεταφορά με εναέριες γραμμές και δικαιολογούν υπόγεια εγκατάσταση. Προκύπτει, συνεπώς, ότι οι υπόγειες γραμμές χρησιμοποιούνται για μικρές σχετικά αποστάσεις και χαμηλότερες τάσεις. Κατά τις διαβάσεις των υπόγειων γραμμών κάτω από τα καταστρώματα των οδών, τα καλώδια τοποθετούνται μέσα σε σωλήνες από τσιμέντο, ή σίδηρο (τα τριπολικά) με διάμετρο λίγο μεγαλύτερη από εκείνη των καλωδίων. Κατ' αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται η εκσκαφή του δρόμου σε περίπτωση βλάβης ή άλλης εργασίας επί των καλωδίων, ενώ ταυτόχρονα μέσω των σωλήνων παρέχεται ενισχυμένη μηχανική προστασία σε αυτά. Οι αγωγοί των

καλωδίων είναι πάντοτε μονωμένοι αγωγοί. Η μόνωση περιβάλλει τους αγωγούς με ορισμένο πάχος μονωτικού υλικού, το οποίο είναι συνήθως μονωτικό χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό λάδι, ελαστικό, συνθετική ουσία ή ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι. Η τεχνική της εγκατάστασης καλωδιακών γραμμών κάτω από τα καταστρώματα των οδών δεν εφαρμόζεται στην Ελλάδα, πλην ειδικών περιπτώσεων.

Τέλος, σχετικά με την τρίτη κατηγορία και την χρήση κατάλληλου περιβλήματος των αγωγών πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κατά κανόνα για μικρές αποστάσεις ή μέσα σε κτίρια, όπου οι γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας οδεύουν μέσα σε οχετούς ή σήραγγες.

Ένας δεύτερος τρόπος διαχωρισμού των γραμμών μεταφοράς θα μπορούσε να γίνει βάση του μήκους τους. Η κατάταξή τους ανάλογα με το μήκος τους εξαρτάται από τις προσεγγίσεις, οι οποίες δικαιολογούνται όσον αφορά στη θεώρηση των παραμέτρων της γραμμής. Έτσι υπάρχουν:

1. Οι γραμμές μικρού μήκους, των οποίων το μήκος δεν ξεπερνά τα 40km.
2. Οι γραμμές μεσαίου μήκους, των οποίων το μήκος βρίσκεται ανάμεσα στα 40km και στα 150km και τέλος,
3. Οι γραμμές μεγάλου μήκους, των οποίων το μήκος ξεπερνά τα 150km.

3.3. Ηλεκτρικά μεγέθη γραμμών μεταφοράς

Μία γραμμή μεταφοράς έχει τέσσερεις παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν την εκπλήρωση της αποστολής της, ως μέρους ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής κατά σειρά σπουδαιότητας [3]:

1. Η ωμική αντίσταση της γραμμής (R), εκφραζόμενη σε ohm ανά μέτρο μήκους,
2. Η αυτεπαγωγή της γραμμής (L), εκφραζόμενη σε henry ανά μέτρο μήκους,
3. Η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής (C), εκφραζόμενη σε farad ανά μέτρο μήκους και
4. Η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής (G), εκφραζόμενη σε mho ανά μέτρο μήκους.

Κατά την λειτουργία της γραμμής, οι παράμετροι αυτές εκδηλώνονται ως ηλεκτρικές αντιστάσεις και αντιδράσεις, καλούνται δε και σταθερές της γραμμής.

3.3.1.Ωμική αντίσταση (R)

Η ωμική αντίσταση ενός αγωγού στη ροή του συνεχούς ρεύματος εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού, και το μέγεθος, το σχήμα και τη θερμοκρασία αυτού. Για έναν αγωγό γραμμής μεταφοράς με ομοιογενή διατομή, το ρεύμα ρέει κατά μήκος αυτού και η αντίσταση R, επομένως, είναι:

$$R = \rho \cdot \left(\frac{l}{q}\right)$$

όπου ρ : η ειδική αντίσταση του αγωγού στη θεωρούμενη θερμοκρασία,

l: το μήκος του αγωγού και

q: το εμβαδόν της διατομής του αγωγού.

Η ειδική αντίσταση χαλκού αγωγιμότητας 100% και υπό θερμοκρασία 20°C είναι σύμφωνα με τους σχετικούς διεθνείς κανονισμούς ίση με 0.017241 microhm-meters, ή 1.7241 microhm-centimeters.

Οι αγωγοί χαλκού, που χρησιμοποιούνται στα υπόγεια καλώδια, είναι ανοπτημένοι και έχουν αγωγιμότητα περίπου 100%. Οι αγωγοί χαλκού, όμως, των εναέριων γραμμών είναι σκληρής ολκήσεως και έχουν κατά 2.5% περίπου μικρότερη αγωγιμότητα, δηλαδή ειδική αντίσταση 0.017683 microhm-meters ή 1.7683 microhm-centimeters στους 20°C.

Η ελάχιστη αγωγιμότητα του αλουμινίου των εναέριων γραμμών είναι 61%, αλλά το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται σήμερα έχει μέση αγωγιμότητα περίπου 62%, δηλαδή ειδική αντίσταση 2.8080 microhm-centimeters στους 20°C.

Στους αγωγούς, οι οποίοι αποτελούνται από κλώνους, το μήκος και βάρος κάθε κλώνου (εκτός του κεντρικού) είναι ελαφρώς αυξημένο, σε σύγκριση με το μήκος του αγωγού, λόγω της συστροφής. Η αύξηση εξαρτάται, φυσικά, από το βήμα της ελικώσεως και αυτό ποικίλει κάπως, συναρτήσει της σχέσεως της διαμέτρου της στρώσεως προς την διάμετρο του κλώνου.

Η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, ώστε για θερμοκρασίες διαφορετικές από 20°C πρέπει να γίνει σχετική διόρθωση. Στην περιοχή 10°C ως 100°C, η μεταβολή της αντιστάσεως του χαλκού και του αλουμινίου, μεταξύ ορισμένων σημείων επί του αγωγού, όταν το μήκος του είναι ελεύθερο να μεταβληθεί, βρίσκεται ότι είναι γραμμική συναρτήσει της θερμοκρασίας, κατά τον ακόλουθο τύπο:

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} \cdot [1 + \alpha_{\theta_1}(\theta_2 - \theta_1)]$$

όπου R_{θ_2} : η αντίσταση υπό θερμοκρασία θ_2 ,

R_{θ_1} : η αντίσταση υπό θερμοκρασία θ_1 και

α_{θ} : ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης υπό θερμοκρασία θ_1 .

3.3.2. Αυτεπαγωγή (L)

Η αυτεπαγωγή ενός αγωγού ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της πεπλεγμένης ροής του μαγνητικού πεδίου του ρεύματος του αγωγού, προς την μεταβολή του ρεύματος. Εκφράζεται από την σχέση:

$$L = \left(\frac{d\lambda}{di} \right)$$

ενώ αν το μαγνητικό κύκλωμα έχει σταθερή μαγνητική διαπερατότητα θα είναι:

$$L = \left(\frac{\lambda}{i} \right)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του διαρρέυματος, προκύπτει ότι η πεπλεγμένη ροή στο εσωτερικό κυλινδρικού αγωγού, ακτίνας r , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I , είναι:

$$A_{\varepsilon\sigma} = \left(\frac{\mu I}{8\pi} \right)$$

και μετριέται σε weber-turn ανά μέτρο μήκους του αγωγού. Επομένως, η αντίστοιχη αυτεπαγωγή είναι:

$$L_{\varepsilon\sigma} = \left(\frac{\mu}{8\pi} \right)$$

και μετριέται σε henry ανά μέτρο μήκους του αγωγού.

Εφαρμόζοντας και πάλι τον νόμο του διαρρέυματος στο εξωτερικό του αγωγού, προκύπτει ότι η εξωτερική πεπλεγμένη ροή η οφειλόμενη στο μαγνητικό πεδίο από την επιφάνεια του αγωγού σε απόσταση D από το κέντρο του για σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_r=1$, δίνεται από την σχέση:

$$A_{\varepsilon\xi} = 2 \times 10^{-7} \cdot I \cdot \ln \left(\frac{D}{r} \right) \quad \text{Wb} - \text{t/m}$$

ενώ η αντίστοιχη αυτεπαγωγή είναι:

$$L_{\varepsilon\xi} = 0.2 \cdot \ln \left(\frac{D}{r} \right) \quad \text{mH/km}$$

Προσθέτοντας, λοιπόν, την αυτεπαγωγή στο εσωτερικό του αγωγού με αυτή στο εξωτερικό, προκύπτει η συνολική αυτεπαγωγή του σε απόσταση D από το κέντρο του που είναι:

$$L = L_{\varepsilon\sigma} + L_{\varepsilon\xi} = 0.2 \cdot \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \quad \text{mH/km}$$

όπου $r'=0.7788r$, δηλαδή η ακτίνα ενός υποθετικού αγωγού χωρίς εσωτερική ροή (μέση γεωμετρική ακτίνα).

Στην περίπτωση της μονοφασικής γραμμής δύο αγωγών, η αυτεπαγωγή της γραμμής είναι:

$$L = 0.4 \cdot \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \quad \text{mH/km}$$

Η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση είναι τα στοιχεία, τα οποία συνιστούν τη σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής μεταφοράς.

3.3.3.Εγκάρσια χωρητικότητα (C)

Η χωρητικότητα μαζί με την αγωγιμότητα συνιστούν την εγκάρσια ή παράλληλη σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής.

Τα στοιχεία σειράς, από τα οποία σημαντικότερο είναι η αυτεπαγωγή, θέτουν ένα όριο στο ρεύμα της γραμμής και συνεπώς, καθορίζουν φυσικά τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος της. Τα παράλληλα στοιχεία, από τα οποία σημαντικότερο είναι η χωρητικότητα, αντιπροσωπεύουν μια οδό διαρροής για τα ρεύματα της γραμμής. Για τάσεις μεταφοράς της τάξης των 300 ως 500kV και μήκη γραμμών μεγαλύτερα από 300 χιλιόμετρα, οι επιπτώσεις των παράλληλων αυτών στοιχείων αποτελούν πρόβλημα βασικής σημασίας για τους μηχανικούς μελετών ή εκμετάλλευσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα καλώδιο υψηλής τάσης, όπου οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των αγωγών ή μεταξύ των αγωγών και των περιβλημάτων έχουν σαν αποτέλεσμα πολύ μεγάλη χωρητικότητα ανά χιλιόμετρο, γίνεται πρακτικά αδύνατη η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, πέρα από 30 ως 50 χιλιόμετρα, χωρίς ειδική αντιστάθμιση του καλωδίου.

Η χωρητικότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$C = \left(\frac{dQ}{dV} \right) \quad \text{farad}$$

ως ο λόγος της μεταβολής του φορτίου προς την μεταβολή της τάσης, η οποία επιβάλλεται σε ένα αγωγό. Αν η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού μέσου είναι σταθερή, τότε:

$$C = \left(\frac{Q}{V} \right) \quad F$$

Στην περίπτωση της μονοφασικής γραμμής δύο αγωγών, η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής είναι:

$$C = \left(\frac{0.0556}{\ln(D/r)} \right) \quad \mu F / km \text{ προς ουδέτερο}$$

Όπου D: η απόσταση από το κέντρο του αγωγού και

r: η ακτίνα του αγωγού.

3.3.4.Εγκάρσια αγωγιμότητα (G)

Αν τα ρεύματα διαρροής των διαφόρων φάσεων αποτελούν συμμετρικό τριφασικό σύστημα, η επίδρασή τους είναι δυνατό να αντιπροσωπευθεί, είτε από μια ομάδα ίσων

εγκάρσιων αγωγιμοτήτων συνδεδεμένων σε τριγωνική διάταξη μεταξύ των αγωγών των φάσεων, είτε από μια ομάδα ίσων εγκάρσιων αγωγιμοτήτων συνδεδεμένων κατά αστέρα μεταξύ των αγωγών των φάσεων, τριπλάσιας αριθμητικής τιμής σε σχέση με τις προηγούμενες. Επειδή οι υπολογισμοί των τριφασικών κυκλωμάτων διευκολύνονται όταν ανάγονται σε βάση φάσεως ουδετέρου, και επειδή και η χωρητικότητα υπολογίσθηκε με αυτόν τον τρόπο, είναι προτιμότερη η διάταξη του αστέρα.

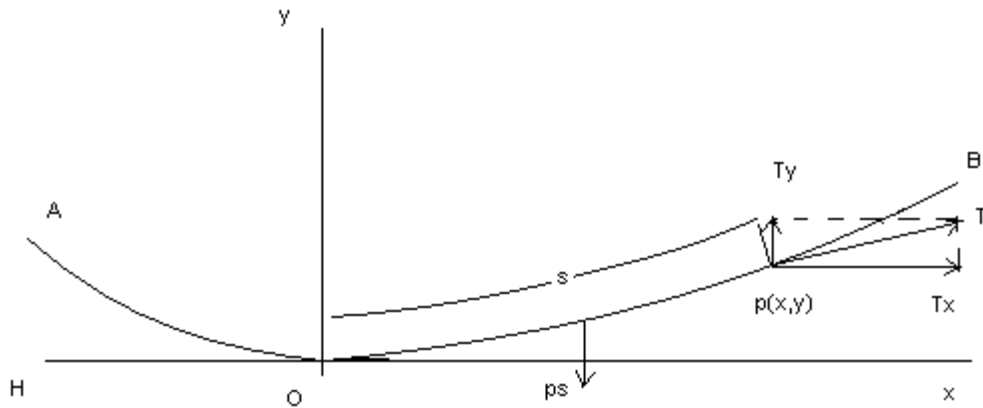
Το κύκλωμα των αγωγιμοτήτων βρίσκεται στην ουσία παράλληλα για κάθε στοιχείο μήκους του κυκλώματος της γραμμής με το αντίστοιχο κύκλωμα των χωρητικότητων.

3.4.Μηχανικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

Η μηχανική σχεδίαση των εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας υπόκειται σε ορισμένους κανόνες, οι οποίοι εξασφαλίζουν το απρόσιτο των αγωγών για το κοινό, αποβλέποντας στην ασφάλειά του. Οι βασικότερες απαιτήσεις της μηχανικής σχεδίασεως των γραμμών μεταφοράς αφορούν στις ελάχιστες αποστάσεις των αγωγών από το έδαφος και από γειτονικά κτίσματα και την μηχανική αντοχή των αγωγών, των μονωτήρων και των φορέων. Οι μηχανικές δυνάμεις, οι οποίες καταπονούν τις γραμμές, είναι το βάρος των αγωγών, η δύναμη του ανέμου και πιθανώς το βάρος του πάγου, ο οποίος σχηματίζεται από το χιόνι. Βάσει των δυνάμεων αυτών, υπολογίζεται, τόσο η καταπόνηση και, συνεπώς, η μηχανική αντοχή αγωγών και στηριγμάτων, όσο και η καμπύλη των αγωγών στο χώρο και οι αποστάσεις τους από το έδαφος.

3.4.1.Υπολογισμός καμπύλης και βέλους αγωγών

Ας υποθέσουμε ότι αγωγός βάρους p ανά μονάδα μήκους αναρτάται από τα σημεία A και B και έστω O το κατώτατο σημείο του αγωγού, δηλαδή το σημείο στο οποίο η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Θεωρούμε σύστημα αξόνων με συντεταγμένες x και y και αρχή το σημείο O . Έστω ένα σημείο P του αγωγού, το οποίο ορίζει ένα τμήμα OP , μήκους S , κατά μήκος της καμπύλης του αγωγού και ψ η γωνία, την οποία σχηματίζει η εφαπτομένη της καμπύλης με την οριζόντια στο σημείο P . Οι δυνάμεις, οι οποίες δρουν στο τμήμα OP , είναι η οριζόντια τάση H στο O , η τάση T στο σημείο P , κατά την εφαπτομένη της καμπύλης με συνιστώσες T_y και T_x , επίσης το βάρος p_s του τμήματος OP , το οποίο εφαρμόζεται κατακόρυφα στο κέντρο βάρους του τμήματος OP .



Σχήμα 3.3: Καμπύλη αγωγού γραμμής με επίδραση του βάρους του

Δεδομένου ότι το τμήμα του αγωγού βρίσκεται σε ισορροπία, τόσο οι οριζόντιες, όσο και οι κατακόρυφες συνιστώσες των δυνάμεων είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή:

$$H = T_x \quad (3.1)$$

$$T_y = ps \quad (3.2)$$

Η πρώτη σχέση δείχνει ότι η οριζόντια συνιστώσα της τάσης, T_x , είναι σταθερή σε όλο το μήκος της γραμμής. Θα είναι, επίσης, ότι:

$$\frac{T_y}{T_x} = \varepsilon\phi\psi \quad (3.3)$$

Είναι, όμως,

$$\varepsilon\phi\psi = \frac{dy}{dx} \quad (3.4)$$

οπότε,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{T_y}{T_x} = \frac{ps}{H} \quad (3.5)$$

Το στοιχειώδες μήκος της καμπύλης στο σημείο P είναι

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (3.6)$$

οπότε,

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{p^2 s^2}{H^2}} \quad (3.7)$$

ή

$$dx = \frac{ds}{\sqrt{1 + \frac{p^2 s^2}{H^2}}} \quad (3.8)$$

Ολοκληρώνοντας και τα δύο μέλη της προηγούμενης εξίσωσης παίρνουμε

$$x + C = \frac{H}{p} \sinh^{-1} \left(\frac{ps}{H} \right) \quad (3.9)$$

όπου C είναι η σταθερά ολοκλήρωσης. Είναι, όμως, για $s=0$, $x=0$, οπότε $C=0$, και από την τελευταία εξίσωση, λύνοντας ως προς s, έχουμε:

$$s = \frac{H}{p} \sinh \left(\frac{px}{H} \right) \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.5) το s με την τιμή του από την εξίσωση (3.10) έχουμε:

$$\frac{dy}{dx} = \sinh \left(\frac{px}{H} \right) \quad \text{ή}$$

$$y = \int \sinh \left(\frac{px}{H} \right) dx$$

ή ακόμη,

$$y = \frac{H}{p} \cosh \left(\frac{px}{H} \right) + D \quad (3.11)$$

όπου D είναι μία άλλη σταθερά ολοκλήρωσης. Στο σημείο O είναι $x=0$ και $y=0$, οπότε για το σημείο αυτό από την εξίσωση (3.11) προκύπτει:

$$D = -\frac{H}{p}$$

Επομένως, η εξίσωση της καμπύλης της γραμμής είναι:

$$y = \frac{H}{p} \left[\cosh \left(\frac{px}{H} \right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

Η καμπύλη αυτή ονομάζεται αλυσοειδής.

Η συνολική τάση T στο σημείο P είναι, βάσει των εξισώσεων (3.1),(3.2) και (3.10),ίση με

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} = \sqrt{H^2 + H^2 \sinh^2 \left(\frac{px}{H} \right)} = \sqrt{H^2 \cosh^2 \left(\frac{px}{H} \right)}$$

δηλαδή

$$T = H \cosh \left(\frac{px}{H} \right) \quad (3.13)$$

Αν τα σημεία ανάρτησης της γραμμής A, B βρίσκονται στο ίδιο ύψος και η μεταξύ τους οριζόντια απόσταση είναι $2l$, τότε στα σημεία αυτά, στα οποία $x = \pm l$ θα είναι:

$$T = H \cosh\left(\frac{pl}{H}\right) \quad (3.14)$$

Η τάση του αγωγού στα σημεία αναρτήσεως, στα οποία αυτή είναι και μεγαλύτερα από κάθε άλλο σημείο της γραμμής, καλείται *τάνυση των αγωγών*. *Βέλος* της γραμμής καλείται η τιμή του y στα σημεία A ή B και δίνεται από την εξίσωση (3.12) για $x=l$:

$$d = \frac{H}{p} \left[\cosh\left(\frac{pl}{H}\right) - 1 \right] \quad (3.15)$$

Το συνολικό μήκος του αγωγού προκύπτει από την εξίσωση (3.10) και είναι:

$$s = 2 \left(\frac{H}{p} \right) \sinh\left(\frac{pl}{H}\right) \quad (3.16)$$

3.4.2. Επίδραση ανέμου και πάγου

Σε περιοχές, στις οποίες η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πέφτει κάτω από 0°C , σχηματίζονται συχνά στρώματα πάγου επάνω στους αγωγούς των γραμμών, τα οποία πολλές φορές έχουν σημαντικό πάχος και επιφάνεια. Η εξωτερική επιφάνεια, την οποία προβάλλει ο αγωγός με το στρώμα του πάγου είναι αυξημένη και επομένως, εκτός από το πρόσθετο βάρος του πάγου, ο αγωγός υφίσταται και αυξημένη δύναμη ανέμου. Κατά τον υπολογισμό του βέλους και της τανύσεως της γραμμής πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι πρόσθετες αυτές εξωτερικές καταπονήσεις.

3.5. Βασική Στάθμη Μόνωσης (Basic Insulation Level)

Κατά τη σχεδίαση των επί μέρους στοιχείων μιας σύνθετης ηλεκτρικής εγκατάστασης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, τόσο οι διηλεκτρικές καταπονήσεις (η κατανομή των καταπονήσεων και το είδος αυτών), όσο και η συμπεριφορά της μόνωσης έναντι των διαφόρων διηλεκτρικών καταπονήσεων [4].

Μία από τις διηλεκτρικές καταπονήσεις είναι και η τάση κανονικής λειτουργίας του δικτύου, η οποία παρόλο το ότι δεν θεωρείται ως ισχυρή καταπόνηση χαρακτηρίζεται από την διαρκή παρουσία της και από το ενδεχόμενο να προκαλέσει γήρανση ορισμένων τουλάχιστον μονώσεων (π.χ. στερεών) ή ακόμη και διάσπαση (υπερπήδηση, διάτρηση), όταν συντρέξουν κατάλληλες προϋποθέσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο μονωτήρας πορσελάνης, ο οποίος φυσιολογικά αντέχει την επιβεβλημένη διαρκώς σε αυτόν τάση

κανονικής λειτουργίας αλλά σε συνθήκες φυσικής ή βιομηχανικής ρύπανσης, είναι πιθανό να υποστεί υπερπήδηση.

Οι υπόλοιπες διηλεκτρικές καταπονήσεις εντάσσονται στις υπερτάσεις (εξωτερικές ή εσωτερικές) και προσδιορίζονται από την τιμή κορυφής τους και τη χρονική μεταβολή τους.

Το πλάτος των υπερτάσεων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέγεθος της τάσης κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Θα μπορούσε, λοιπόν, να θεωρηθεί ότι η διαβάθμιση της μόνωσης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού αφορά τις αναμενόμενες υπερτάσεις. Αυτό ασφαλώς δεν είναι αληθές και θα οδηγούσε σε ιδιαίτερα αντιοικονομικές κατασκευές. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπερτάσεις είναι μεγέθη εμφανιζόμενα με στατιστική κατανομή και, βέβαια, δεν μπορεί να αποκλειστεί η εμφάνιση υπέρτασης μεγαλύτερης από την μέγιστη καταγραφείσα ή παρατηρηθείσα, βάση της οποίας θα είχε σ' αυτή την φανταστική περίπτωση διαστασιοποιηθεί η μόνωση, οπότε και θα σημειωνόταν διάσπαση της μόνωσης. Τα τελευταία αφορούν κυρίως τις υπερτάσεις λόγω κεραυνών.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι διαβάθμισης της μόνωσης [5]:

- 1)η συμβατική μέθοδος,
- 2)η στατιστική μέθοδος και
- 3)η ημιστατική μέθοδος.

3.5.1.Συμβατική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης

Η συμβατική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης γίνεται με την θεώρηση μίας τιμής υπέρτασης U_s σαν μέγιστη δυνατή εμφανιζόμενη και στην συνέχεια, ενός συγκεκριμένου ποσοστού ασφαλείας (π.χ. 25%) μέσω του οποίου φθάνουμε στον προσδιορισμό της αντοχής της μόνωσης U_w . Στην μέθοδο αυτή, δεν λαμβάνεται υπόψη ο στατιστικός χαρακτήρας, τόσο της διηλεκτρικής αντοχής ενός ανοίγματος αέρα, όσο και του μεγέθους της εμφανιζόμενης υπέρτασης. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι το γεγονός ότι η, κατά κάποιο τρόπο, αυθαίρετη επιλογή του περιθωρίου ασφαλείας, μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιοποίηση της μόνωσης, με συνέπεια την σοβαρή οικονομική επιβάρυνση της κατασκευής.

3.5.2.Στατιστική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης

Η μέθοδος αυτή απέκτησε σημαντικό ενδιαφέρον κατά την σχεδίαση της μόνωσης δικτύων ΥΥΤ. Η αιτία του γεγονότος αυτού πρέπει να αναζητηθεί στο ότι η διηλεκτρική

αντοχή ενός ανοίγματος αέρα (μέγεθος με έντονο στατιστικό χαρακτήρα) παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά τιμών σε εσωτερικές, παρά σε εξωτερικές υπερτάσεις, σε συνδυασμό με το ότι κατά την σχεδίαση δικτύων ΥΥΤ λαμβάνονται, κυρίως, υπόψη οι εσωτερικές υπερτάσεις.

Κατά την εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου, θεωρούμε σαν τυχαίες μεταβλητές τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης και το εύρος της επιβαλλόμενης υπέρτασης και φυσικά, προϋποτίθεται ότι είναι γνωστή η στατιστική κατανομή των υπερτάσεων, καθώς και η αντίστοιχη κατανομή της τάσης διασπάσεως της μόνωσης.

Η στατιστική κατανομή των υπερτάσεων που είναι δυνατό να εμφανισθούν σε συγκεκριμένη θέση δικτύου (δηλαδή η αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του εύρους των υπερτάσεων, $P_o(V)$) προσδιορίζεται μετά από μελέτες υπερτάσεων.

Αναφορικά με την στατιστική κατανομή της αντοχής των μονώσεων υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την εύρεση της. Ένας από αυτούς είναι ο εξής:

Ξεκινώντας από υπέρταση μέγιστης τιμής \hat{U}_1 , θεωρούμε και τις υπερτάσεις μέγιστων τιμών $\hat{U}_2, \hat{U}_3, \dots, \hat{U}_{n-1}, \hat{U}_n$, κάθε μία εκ των οποίων διαφέρει από την προηγούμενή της κατά σταθερή ποσότητα $\Delta\hat{U}$, δηλαδή

$$\hat{U}_2 - \hat{U}_1 = \hat{U}_3 - \hat{U}_2 = \dots = \hat{U}_n - \hat{U}_{n-1} = \Delta\hat{U}$$

Κάθε μία από τις παραπάνω κρουστικές τάσεις, τις επιβάλλουμε συνεχώς (π.χ. Ν φορές) στην ελεγχόμενη μόνωση και απαριθμούμε πόσες φορές από τις Ν η επιβληθείσα υπέρταση \hat{U}_i οδήγησε σε διάσπαση της μόνωσης. Αν συνέβησαν K_i διασπάσεις, το πηλίκο

$$\lambda_i = \frac{K_i}{N}$$

παριστάνει την συχνότητα διάσπασης της μόνωσης υπό την υπέρταση \hat{U}_i . Το ίδιο μέγεθος λ_i θα παριστάνει την πιθανότητα, με την οποία η τάση \hat{U}_i θα προκαλέσει διάσπαση της μόνωσης. Τα ζεύγη τιμών (\hat{U}_i, λ_i) ορίζουν την καμπύλη διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης $P_w(U)$. Έχοντας την καμπύλη $P_w(U)$, γνωρίζουμε πλήρως τη συμπεριφορά της μόνωσης, όσον αφορά τη διηλεκτρική της αντοχή. Η καμπύλη αυτή, μπορεί να ευρεθεί κατόπιν εργαστηριακών δοκιμών, εφόσον η ελεγχόμενη μόνωση είναι αυτοεπανερχόμενη και το ζεύγος σημείων $(V_i, P_w(V_i))$ έχει την παρακάτω έννοια:

- - Η τάση V_i επιβαλλόμενη πολλές φορές στην ελεγχόμενη μόνωση, οδηγεί με συχνότητα $P_w(V_i)$ σε διάσπαση ή (αν το πλήθος των επιβολών τάσης τείνει στο άπειρο) η πιθανότητα διάσπασης της μόνωσης, όταν αυτή καταπονείται με τάση V_i είναι $P_w(V_i)$. Γνωρίζοντας ήδη τις κατανομές $P_o(U)$ και $P_w(U)$, μπορούμε να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας ή κίνδυνο αποτυχίας (risk of failure) της μόνωσης από την σχέση:

$$R = \int P_w(U) \cdot P_o(U) dU$$

Η στατιστική μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί, όταν έχουμε να κάνουμε με αυτοεπανερχόμενες μονώσεις, γιατί είναι γνωστά τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν την διηλεκτρική τους συμπεριφορά (καμπύλη P_w). Αντίθετα, οι γνώσεις μας είναι λίγες για τις μη αυτοεπανερχόμενες μονώσεις (στερεές μονώσεις ή γενικότερα μονώσεις που καταστρέφονται μετά από μία διάσπαση) και γι' αυτό τον λόγο συνιστάται, όπως σ' αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή της συμβατικής μεθόδου διαβάθμισης της μόνωσης.

3.5.3. Ημιστατιστική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης

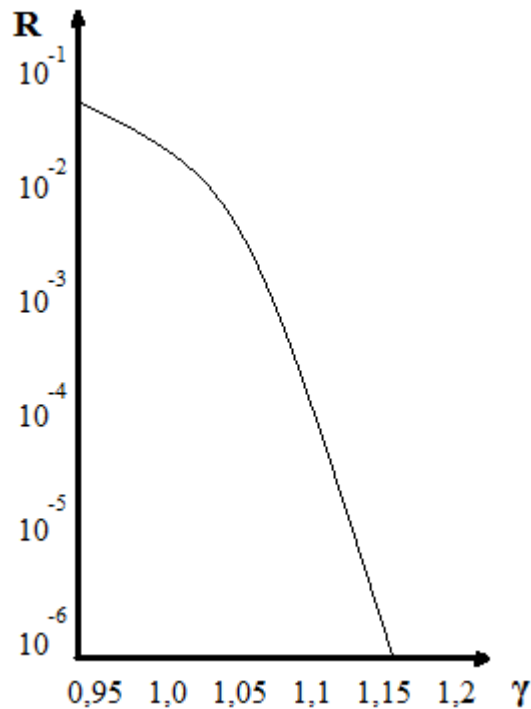
Στην πράξη, εφαρμόζεται συχνά η λεγόμενη ημιστατιστική μέθοδος διαβάθμισης της μόνωσης, δεδομένου ότι η εφαρμογή της στατιστικής μεθόδου είναι μάλλον πολύπλοκη. Τόσο η κατανομή των υπερτάσεων, όσο και η διηλεκτρική συμπεριφορά της μόνωσης, αντί να περιγραφούν μέσω των δύο αναφερθείσων στατιστικών καμπύλων, περιγράφονται μέσω δύο τιμών τάσεως. Έτσι, αντιπροσωπευτικό μέγεθος των υπερτάσεων λαμβάνεται η υπέρταση $U_{\bar{v}2\%}$, εκείνη δηλαδή η υπέρταση την οποία μπορεί να υπερβεί μία άλλη εμφανιζόμενη με πιθανότητα 2%, ενώ η αντοχή της μόνωσης περιγράφεται από την τιμή $U_{w90\%}$, εκείνη, δηλαδή, την τιμή της τάσης, η οποία με πιθανότητα 90% δεν προκαλεί διάσπαση της μόνωσης. Στη συνέχεια, ορίζονται τα μεγέθη «λόγος ασφάλειας» (γ) και «περιθώριο ασφάλειας» (ε) ως εξής:

$$\gamma = \frac{U_{w90\%}}{U_{\bar{v}2\%}}$$

και

$$\varepsilon = \frac{U_{w90\%} - U_{\bar{v}2\%}}{U_{\bar{v}2\%}} = \gamma - 1$$

Από τον λόγο γ και την καμπύλη του Σχήματος 3.4 που αναφέρεται σε υπερτάσεις χειρισμών και σε μονώσεις υπερευνηλής τάσεως είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο κίνδυνος αστοχίας της μόνωσης.



Σχήμα 3.4: Κίνδυνος αστοχίας της μονώσεως R συναρτήσει του στατιστικού λόγου ασφαλείας γ

3.5.4.Στάθμες μόνωσης δικτύων

Οι διεθνείς κανονισμοί (IEC κλπ.), λαμβάνοντας υπ' όψη τις τρεις παραπάνω μεθόδους και τη συγκεντρωμένη εμπειρία από την λειτουργία εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων, καθιέρωσαν συγκεκριμένες στάθμες μόνωσης, τις οποίες συνιστούν για κάθε δίκτυο.

BIL (Basic Insulation Level) ονομάζεται η βασική στάθμη μόνωσης σε κεραμικές υπερτάσεις. Έτσι, για δίκτυο μέγιστης τάσης λειτουργίας $U_m=420kV$, οι σχετικές προδιαγραφές προβλέπουν τις τιμές 1050 ή 1175 ή 1300 για εξοπλισμό προστατευμένο από αλεξικέραυνα και 1175 ή 1300 ή 1425 σχετικά με την στάθμη μόνωσης.

Από τις παραπάνω τιμές, επιλέγεται η στάθμη μόνωσης του εκάστοτε εξοπλισμού που μελετάται, ανάλογα με τις αναμενόμενες υπερτάσεις και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων διατάξεων προστασίας (διάκενα αέρος ή καθοδικά αλεξικέραυνα).

3.6.Βιβλιογραφία

- [1] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, «Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Τόμος Ι, Αθήνα 1994
- [2] Λ. Οικονόμου, «Ανάπτυξη μεθοδολογιών για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς και τη σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Μάιος 2006
- [3] Β. Παπαδιάς, “Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών
- [5] Ε. Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985

Κεφάλαιο 4

Αντικεραυνική προστασία γραμμών μεταφοράς

4.1. Κεραυνικά πλήγματα στις γραμμές μεταφοράς

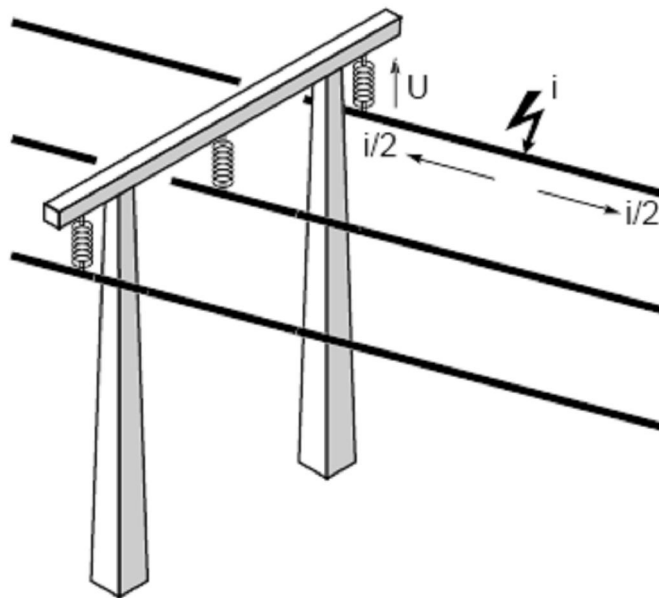
Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους ένας κεραυνός μπορεί να δημιουργήσει υπέρταση σε μια γραμμή μεταφοράς που είναι οι εξής [1]:

- Από επαγωγή, εξαιτίας κεραυνού που πλήττει το έδαφος κοντά στη γραμμή,
- Από άμεσο πλήγμα κεραυνού σε έναν αγωγό φάσεως
- Από πλήγμα στον αγωγό προστασίας με τον οποίο προστατεύονται γενικά οι γραμμές μεταφοράς από κεραυνούς.

4.1.1. Άμεσο κεραυνικό πλήγμα επί του αγωγού φάσης

Στην περίπτωση που ένας κεραυνός πλήξει απευθείας έναν αγωγό φάσης, τότε λόγω της πολύ μικρής διάρκειας του ρεύματος του κεραυνού $i(t)$, το ρεύμα αυτό συμπεριφέρεται ως οδεύον κύμα. Έναντι του επιπίπτοντος κύματος του ρεύματος του κεραυνού, η γραμμή εμφανίζεται με την κυματική αντίστασή της Z . Το αποτέλεσμα της πτώσης του κεραυνού στη γραμμή είναι διαφορετικό, ανάλογα με το σημείο πτώσης του κεραυνού. Εάν ο κεραυνός επιπίπτει στο άκρο της γραμμής, παράλληλα με το οδεύον κύμα του ρεύματος, δημιουργείται και ένα οδεύον κύμα τάσης ίσο με $Z \cdot i(t)$. Εάν ο κεραυνός επιπίπτει στο μέσο μιας γραμμής, τότε το συνολικό ρεύμα $i(t)$ του κεραυνού διαμοιράζεται σε δύο ίσα μέρη, δημιουργώντας αντίστοιχα κύματα τάσης $Z \cdot (i(t)/2)$ [2]. Στον πρώτο πυλώνα που θα συναντήσει το διαδιδόμενο προς μία κατεύθυνση κύμα, το δυναμικό του αγωγού φάσης θα αρχίσει να αυξάνει σύμφωνα με την κυματομορφή της τάσης μέχρις ότου επέλθει (εάν επέλθει) διάσπαση της μόνωσης μεταξύ αγωγού φάσης και πυλώνα. Έτσι, το κύμα που θα

συνεχίσει την πορεία του μετά τον 1^ο πυλώνα θα είναι ένα πλήρες κύμα εάν δεν έχουμε διάσπαση της μόνωσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε ένα αποκομμένο κύμα. Εάν λάβει κανείς υπόψη τις αποστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεων και των μεταλλικών στοιχείων του πυλώνα, προκύπτει ότι υπάρχει για κάθε ονομαστική τάση δικτύου μια κριτική τιμή του ρεύματος κορυφής του κεραυνού, κάτω από την οποία δεν λαμβάνει χώρα διάσπαση της μόνωσης της γραμμής όταν αυτή προσβάλλεται απ' ευθείας πάνω σε αγωγό φάσης από κεραυνό.



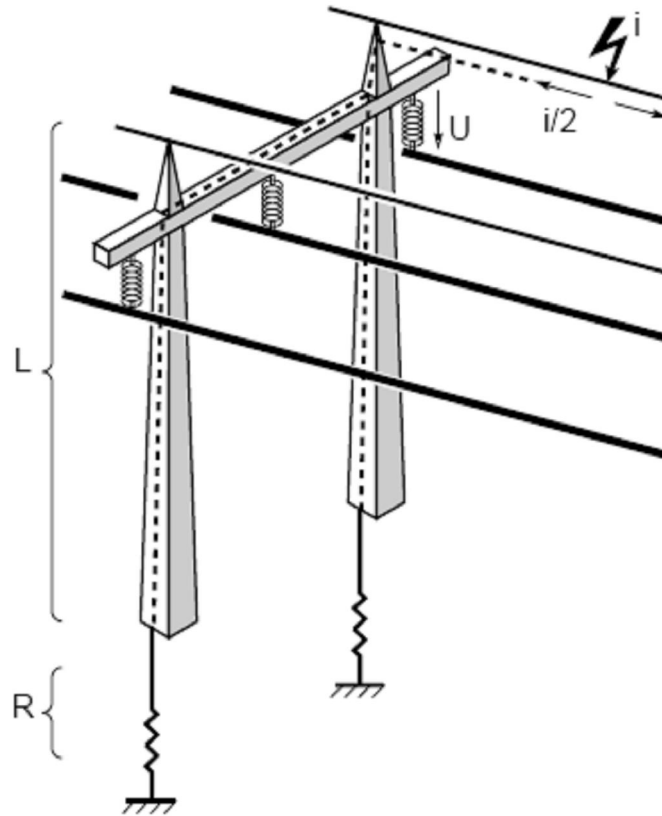
Σχήμα 4.1: Άμεσο κεραυνικό πλήγμα επί του αγωγού φάσης

4.1.2. Ανάστροφη διάσπαση

Υπάρχουν δύο ενδεχόμενα δημιουργίας ανάστροφης διάσπασης: είτε εάν προσβληθεί απ' ευθείας ένας πυλώνας ή ένας αγωγός προστασίας από κεραυνό, οπότε ανυψώνεται το δυναμικό του πυλώνα, είτε εάν, αφού προσβληθεί μια φάση από κεραυνό και διασπασθεί η μόνωση της, ανυψωθεί το δυναμικό του πυλώνα, οπότε, ενδεχομένως, σημειώνεται ανάστροφη διάσπαση μεταξύ πυλώνα και μιας υγιούς, μέχρι τότε φάσης [3]. Και στις δύο περιπτώσεις η ροή του ρεύματος προς τη γη μέσω της μεταλλικής κατασκευής του πυλώνα προκαλεί μία ανύψωση του δυναμικού των ανωτέρων μεταλλικών μερών του πυλώνα. Η σχετική τάση που εμφανίζεται κατ' μήκος της αλύσου του μονωτήρα εξαρτάται από την αντίσταση γείωσης του πύργου R , από την αυτεπαγωγή L αυτού και από τον τρόπο που διαμοιράζεται το ρεύμα της ατμοσφαιρικής εκκενώσεως στα μεταλλικά μέρη

του πυλώνα. Εάν $K_i(t)$ είναι το κλάσμα εκείνο του όλου ρεύματος που διέρχεται ένα πυλώνα προς τη γη, τότε η τάση κατά μήκος της αλύσου του μονωτήρα θα είναι:

$$U(t) = K[Ri + L \frac{di}{dt}]$$



Σχήμα 4.2: Κεραυνικό πλήγμα επί του αγωγού γείωσης

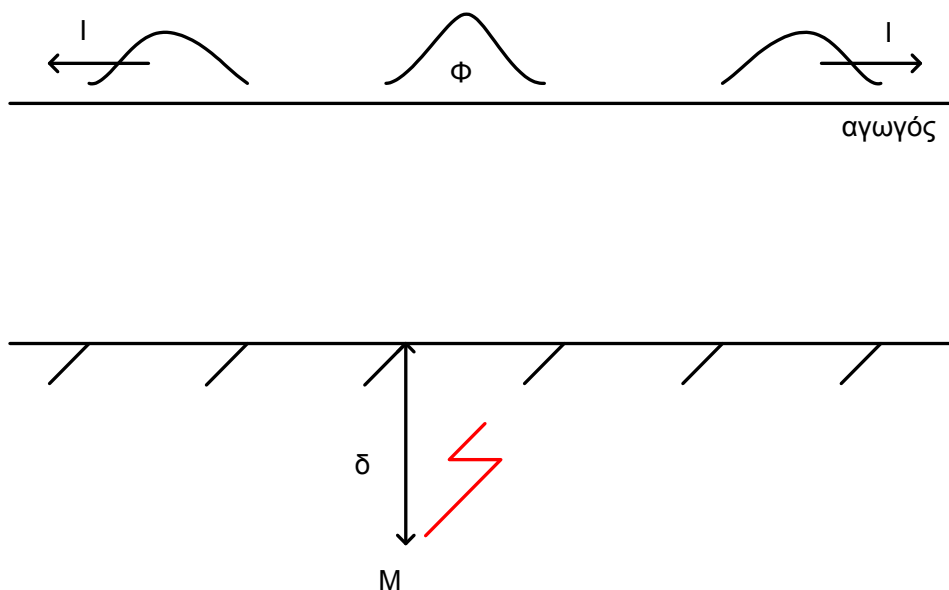
Εάν η τιμή αυτή της τάσης υπερβεί την αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε ανάστροφη διάσπαση. Το μέγεθος της αναπτυσσόμενης τάσης εξαρτάται κυρίως από το κεραυνικό ρεύμα και την αντίσταση γείωσης του πυλώνα. Για να μειωθεί, λοιπόν, ο κίνδυνος ανάστροφων διασπάσεων, θα πρέπει η αντίσταση γείωσης να είναι μικρή.

4.1.3.Επαγόμενο κεραυνικό πλήγμα

Στην περίπτωση πτώσης του κεραυνού κοντά στη γραμμή, η γραμμή και το έδαφος δρουν ως ένα τεράστιος πυκνωτής που είναι φορτισμένος με θετικό φορτίο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερτάσεων (επαγόμενο κεραυνικό πλήγμα).

Καθώς ο οδηγός οχετός του κεραυνού κατέρχεται προς το έδαφος, κοντά σε μια γραμμή, φορτίο Φ , με πρόσημο αντίθετο από αυτό του οχετού, συσσωρεύεται στην περιοχή της γραμμής που πρόσκειται στον οχετό. Εάν ο οχετός δεν πλήξει τη γραμμή, αλλά ένα σημείο M του εδάφους σε απόσταση δ από τον άξονα xx' της γραμμής, τότε με την απότομη

εξουδετέρωση του φορτίου που θα συμβεί, θα πάψει να υπάρχει ο λόγος συσσώρευσης του φορτίου Φ και αυτό θα διαχυθεί με τη μορφή δύο αντίθετων κυμάτων ρεύματος I προς τις απομακρυσμένες περιοχές της γραμμής από όπου είχε προηγούμενα προέλθει. Κάθε ένα από τα ρεύματα πολλαπλασιάζεται με την κυματική αντίσταση της γραμμής, δίνει μία τάση $V=Z \cdot I$. Επειδή το επαγόμενο φορτίο Φ είναι πάντοτε σημαντικά μικρότερο από το φορτίο του κεραυνού, η επαγόμενη υπέρταση δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει πρόβλημα στη γραμμή. Ωστόσο, για γραμμές διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, η υπέρταση αυτού του τύπου μπορεί να είναι επικίνδυνη για τη μόνωση της γραμμής [4].



Σχήμα 4.3: Επαγόμενο κεραυνικό πλήγμα

4.2. Αντικεραυνική προστασία γραμμών μεταφοράς

Για την προστασία των γραμμών μεταφοράς από υπερτάσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

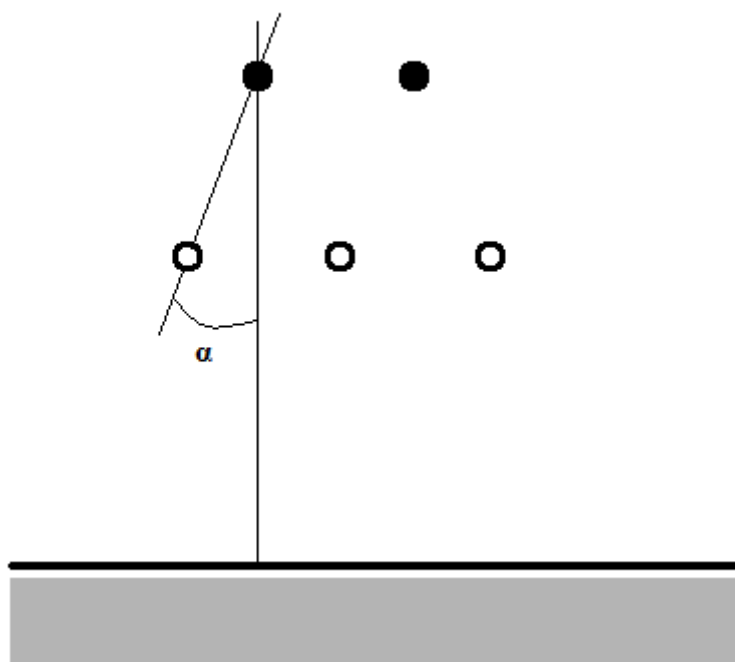
- α) Με τοποθέτηση σε κατάλληλες θέσεις πάνω από τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις γειωμένοι αγωγοί (αγωγοί προστασίας) που συλλέγουν τα άμεσα πλήγματα, προστατεύοντας έτσι τα ενεργά στοιχεία του συστήματος.
- β) Με σύνδεση ανάμεσα στα ενεργά στοιχεία του συστήματος και τη γη ειδικών συσκευών με ασθενή μόνωση (αλεξικέραυνα).

[Η περίπτωση αυτή εξετάζεται στο Κεφάλαιο 5]

Όσον αφορά την αποφυγή των άμεσων πληγμάτων στους αγωγούς τοποθετούνται τα σύρματα γης, κατάλληλα εγκατεστημένα, ώστε να προστατεύουν τους αγωγούς και κατάλληλα γειωμένα μέσω αντιστάσεων γειώσεως, μικρής σχετικά τιμής. Με τους αγωγούς προστασίας προστατεύονται οι αγωγοί τόσο έναντι άμεσων πληγμάτων, όσο και έναντι επαγόμενων ατμοσφαιρικών υπερτάσεων [1].

Τα σύρματα γης είναι αγωγοί, συνήθως χαλύβδινοι, αλλά ενίοτε και από αλουμίνιο, ή χαλκό, ή κράμα αλουμινίου, τοποθετούμενα ψηλότερα από τους αγωγούς των γραμμών, ώστε να πλήττονται αυτοί από τους κεραυνούς και έτσι να μειώνουν τις επιπτώσεις τους. Γενικά, είναι αγώγιμα συνδεδεμένα στους χαλύβδινους πυλώνες και γειώνονται μέσω αυτών. Μερικές φορές, όμως, είναι μονωμένα από τους πυλώνες, μέσω κάποιας ελάχιστης μόνωσης, ώστε να μπορούν να χρησιμεύουν για τη μετάδοση σημάτων επικοινωνιών. Τα κύματα των υπερτάσεων, όπως αυτά που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα, διασπούν την ελάχιστη αυτή μόνωση, γειώνοντας κατ' αυτών τον τρόπο αποτελεσματικά τους αγωγούς προστασίας.

Παρά την τυχαιότητα και την ιδιορρυθμία που διέπει την πτώση των κεραυνών, είναι γενικά αποδεκτό ότι ο κεραυνός θα επιλέξει για να πλήξει το υψηλότερο γειωμένο σημείο της εγκατάστασης εντός ορισμένης περιοχής. Βάσει αυτής της αρχής, η προσφερόμενη προστασία σε μια γραμμή από τους αγωγούς γείωσης, είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων. Βασική σημασία για την αποδοτικότητα της προστασίας παίζει η «γωνία προστασίας», με την οποία ο αγωγός προστασίας καλύπτει τους ενεργούς αγωγούς. Η «γωνία προστασίας» είναι η γωνία α μεταξύ της κατακόρυφου από τον αγωγό προστασίας και της πλάγιας γραμμής που συνδέει το σύρμα με τον προστατευόμενο αγωγό (Σχήμα 4.4). Αναφέρεται, συνήθως, στον πιο απομακρυσμένο αγωγό της γραμμής και όσο μικρότερη είναι η γωνία αυτή, τόσο καλύτερα προστατεύεται ο αγωγός. Μία γωνία 30° είναι η συνήθως συνιστώμενη, αν και μέχρι 40° είναι αποδεκτή.



Σχήμα 4.4: Γωνία προστασίας α αγωγού γης

Εξίσου σημαντική είναι και η αντίσταση γείωσης του αγωγού προστασίας, η οποία καθορίζει τις διαφορές δυναμικού, οι οποίες θα αναπτυχθούν μεταξύ των αγωγών φάσεων και των γειωμένων στοιχείων. Κατά προσέγγιση, αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί εύκολα να υπολογισθεί, αν ληφθεί υπ' όψη μόνο η αντίσταση της γείωσης R_g (αγνοηθούν οι αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές), οπότε είναι

$$V = R_g \cdot I$$

Δεδομένου ότι υπερτάσεις γύρω στα 200kV δεν δημιουργούν κινδύνους διασπάσεων σε γραμμές ΥΤ, ενώ αντίθετα για τις γραμμές ΜΤ είναι πολύ πιθανό να οδηγούν σε δευτερεύουσες διασπάσεις, η πρόσθετη δαπάνη που συνεπάγεται η εγκατάσταση του αγωγού προστασίας, αλλά και η ανάγκη κατασκευής γειώσεων χαμηλής σχετικά αντιστάσεως, δεν δικαιολογείται κατά κανόνα για γραμμές πάνω των 66kV. Εξαίρεση μπορεί να αποτελούν τμήματα γραμμών σε ιδιαίτερα κεραυνόπληκτες περιοχές.

4.3.Γραμμή μεταφοράς με αγωγούς προστασίας – Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο

Εφόσον οι αγωγοί προστασίας έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα, κάθε ατμοσφαιρική εκκένωση με τιμή ρεύματος πάνω από συγκεκριμένο όριο, προσβάλλει τους αγωγούς προστασίας, ενώ κεραυνοί μικρότερης έντασης, προσβάλλουν τις φάσεις, πλην όμως η προκύπτουσα υπέρταση δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει σφάλμα πάνω στην γραμμή. Επομένως, πρέπει να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού του αγωγού προστασίας, ώστε να καθοριστούν οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών προστασίας και των φάσεων και, ακόμη, να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού των γειτονικών πύργων, ώστε να καθορισθεί η μόνωση μεταξύ αυτών και των φάσεων [4].

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

Βασικές παράμετροι της σχεδίασης μιας γραμμής μεταφοράς, όσον αφορά τη μόνωσή της, είναι το διάκενο αέρα ανάμεσα στις φάσεις και τους πύργους, το μήκος ερπισμού 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 μιας γραμμής μεταφοράς απαιτεί για κάθε παράμετρο να ληφθεί η μέγιστη από τις ελάχιστες τιμές που προκύπτουν για την ίδια παράμετρο, όταν εξετάζονται χωριστά τα διάφορα είδη καταπονήσεων.

Η ηλεκτρογεωμετρική μέθοδος για τον καθορισμό της θέσης των αγωγών προστασίας βασίζεται στην έννοια της «απόστασης διασπάσεως» (striking distance) και διατυπώθηκε από τον Whitehead [5]. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός πως η θέση που θα πλήξει ο κεραυνός αποφασίζεται μόνο την στιγμή που η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού πλησιάζει την γη σε απόσταση διασπάσεως. Σαν *απόσταση διασπάσεως* ορίζεται το μήκος διακένου που διασπάται υπό την τάση (ως προς γη) της κεφαλής του οχετού. Επειδή αυτή η τάση εξαρτάται από το φορτίο του οχετού, είναι προφανές ότι η απόσταση διασπάσεως είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο του κεραυνού. Για την εκτίμηση

της απόστασης διασπάσεως, γίνεται δεκτό πως η μέση απαιτούμενη τάση διασπάσεως είναι 3-6kV/cm.

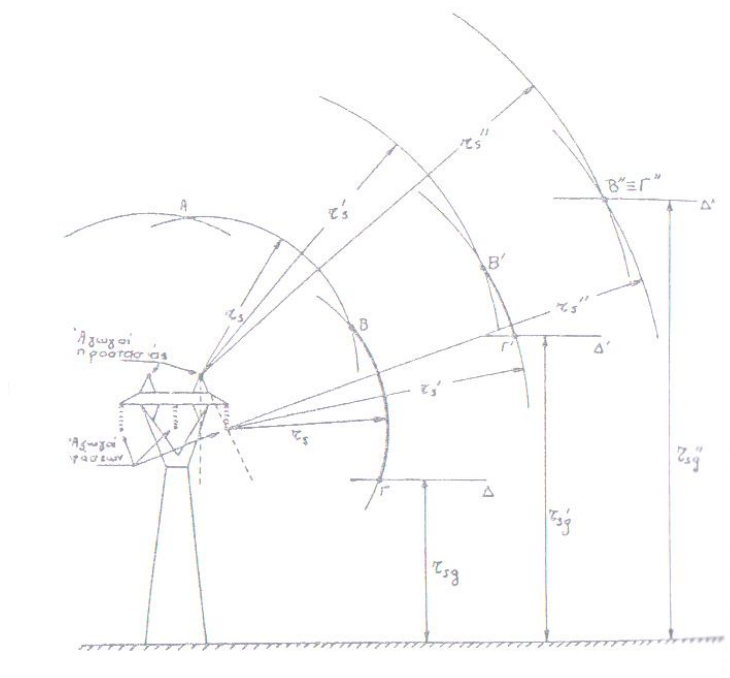
Σχηματίζοντας το περίγραμμα της απόστασης διασπάσεως (r_s) γύρω από τους αγωγούς προστασίας, αγωγούς φάσεων και γης, όπως δείχνει το Σχήμα 4.5, γίνεται φανερό πως μόνο ένας κεραυνός του οποίου η κεφαλή θα διέλθει το τόξο ΒΓ θα πλήξει τον αγωγό φάσης, ενώ αν διέλθει τη γραμμή θα πλήξει το έδαφος.

Επειδή η απόσταση διάσπασης, υπό την τάση αυτή, εξαρτάται από την γεωμετρία του διακένου, η απόσταση διασπάσεως προς γη (r_{sg}), λαμβάνεται, γενικά, διαφορετική από την απόσταση διάσπασης προς τους αγωγούς φάσεων και προστασίας (r_s). Οι δυο αποστάσεις r_{sg} και r_s συνδέονται με την σχέση

$$\frac{r_s}{r_{sg}} = \frac{1}{k_{sg}}$$

που είναι ανάλογη προς την σχέση καθορισμού του «συντελεστή διακένου». Το k_{sg} κυμαίνεται από 0.65 για γραμμές υπερυψηλής τάσης μέχρι 1 για γραμμές χαμηλής σχετικά τάσης. Το Σχήμα 4.5 έχει σχεδιαστεί για $k_{sg}=1$.

Είναι προφανές από το Σχήμα 4.5, πως όσο το r_s αυξάνει, πράγμα που συμβαίνει όταν το φορτίο του κεραυνού αυξάνει, το εκτεθειμένο περίγραμμα ΒΓ, για ορισμένη θέση του αγωγού προστασίας, μικραίνει και πέραν από ορισμένη τιμή του r_s , που συμβαίνει για κεραυνούς με φορτίο μεγαλύτερης ορισμένης τιμής, το ΒΓ μηδενίζεται.



Σχήμα 4.5: Τοποθέτηση του αγωγού προστασίας με βάση την απόσταση διάσπασης (striking distance)

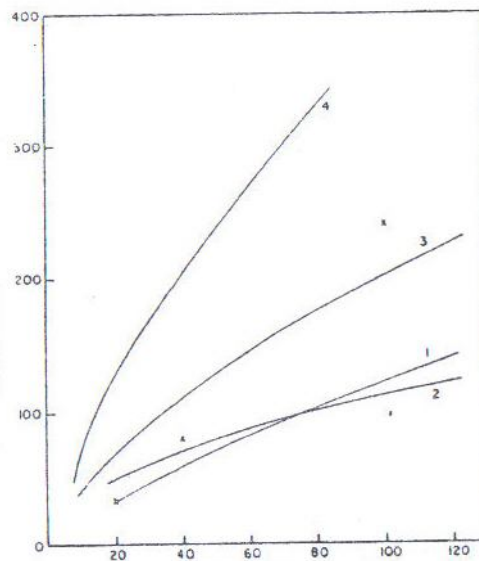
Επειδή το φορτίο του κεραυνού συνδέεται άμεσα με το ρεύμα του I_0 , θα πρέπει να υφίσταται μια σχέση ανάμεσα στα r_s και I_0 . Κατά Whitehead ισχύει

$$r_s = 6.7I_0^{0.8} \quad (r_s \text{ σε μέτρα για } I_0 \text{ σε } kA)$$

Ενώ κατά Love ισχύει

$$r_s = 8I_0^{0.65} \quad (r_s \text{ σε μέτρα για } I_0 \text{ σε } kA)$$

Στο Σχήμα 4.6 δίνονται καμπύλες με διάφορες εκτιμήσεις της απόστασης διάσπασης για αρνητικό κατερχόμενο οχετό. Απ' αυτές η καμπύλη 3 είναι η πιο πρόσφατη και πρέπει να θεωρείται σαν η πιο αξιόπιστη.



Σχήμα 4.6: Εξάρτηση της απόστασης διάσπασης από το εύρος του ρεύματος αρνητικών κεραυνών

Σαν παράδειγμα αναφέρεται πως για $I_0=20$ kA, η καμπύλη 3 δίνει $r_s=68$ m, ενώ οι τύποι Whitehead και Love δίνουν $r_s=73.6$ και 56 m αντίστοιχα.

Κεραυνοί με I_0 μεγαλύτερο από την τιμή για την οποία το εκτεθειμένο περίγραμμα ΒΓ μηδενίζεται, δεν μπορούν, κατά την πιο πάνω θεωρία, να πλήξουν τους αγωγούς των φάσεων. Κεραυνοί εξ' άλλου, με $I_0=I_{\text{κρίσιμο}}$ τέτοιοι ώστε

$$\frac{1}{2}(I_{\text{κρ}} Z_0) < V_{\mu}$$

όπου V_{μ} η τάση μονώσεως της γραμμής και Z_0 η κυματική της αντίσταση, είναι ακίνδυνοι για την γραμμή, έστω και αν πλήξουν τον αγωγό μιας φάσης. Η r_{sc} που αντιστοιχεί στο $I_{\text{κρ}}$ καλείται κρίσιμη. Βραχυκυκλώματα από κεραυνούς που οφείλονται σε ατελή θωράκιση

μπορούν, λοιπόν, να συμβούν σε μια γραμμή, μόνο για τιμές του I_0 μεταξύ δυο ορίων που ορίζονται με τους πιο πάνω συλλογισμούς.

4.4.Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Ταχεία Μεταβατικά Φαινόμενα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1997
- [2] Μιχαήλ Γ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Αθήνα 2005
- [3] Π. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Αθήνα 1994
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών
- [5] Χρήστος Μαινεμενλής, “Μόνωση Ηλεκτρικών Δικτύων Υψηλής Τάσης”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2008

Κεφάλαιο 5

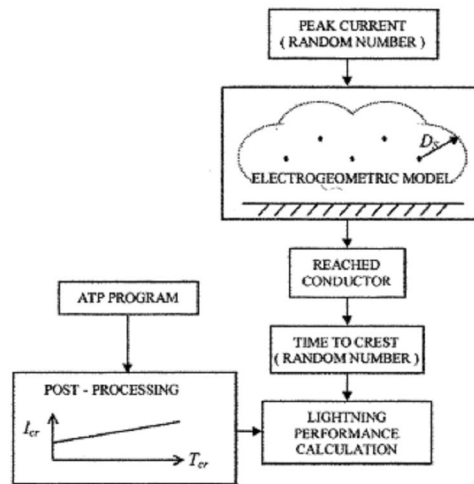
Υπολογισμός πιθανότητας καταστροφής καθοδικών αλεξικέραυνων σε γραμμή υψηλής τάσης

5.1.Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε και ανωτέρω, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις κατά τις οποίες ένας κεραυνός μπορεί να πλήξει μια γραμμή μεταφοράς. Πρώτον, έχουμε το πλήγμα κατευθείαν στον αγωγό φάσης, δεύτερον έχουμε το έμμεσο κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό προστασίας, ενώ υπάρχει και το επαγωγικό κεραυνικό πλήγμα, σε περίπτωση κεραυνού κοντά στη γραμμή. Στην παρούσα εργασία, θα προσομοιώσουμε μοντέλα που αφορούν τις δύο πρώτες περιπτώσεις.

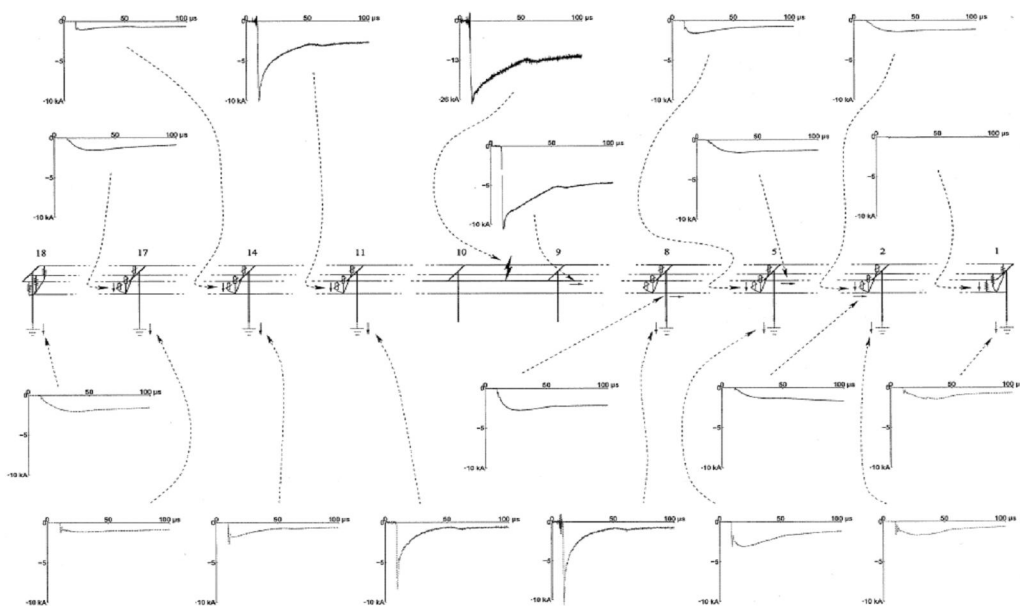
5.1.1.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η εγκατάσταση αλεξικέραυνου σε όλους τις πυλώνες και σε όλες τις φάσεις παρέχει την πιο αποτελεσματική προστασία στη γραμμή (μηδενίζοντας πρακτικά την πιθανότητα σφάλματος της γραμμής, παραμένει, όμως, η πιθανότητα καταστροφής κάποιου αλεξικέραυνου), με το κόστος, όμως, να είναι μεγάλο και την επένδυση ως εκ τούτου υπέρογκη και ανέφικτη. Στο [1] γίνεται προσομοίωση των γραμμών του συστήματος μεταφοράς της Βραζιλίας με χρήση του υπολογιστικού πακέτου EMTP/ATP και υπολογίζεται με τη χρήση της αλγοριθμικής διαδικασίας του Σχήματος 5.1 ο αριθμός των σφαλμάτων της γραμμής για την τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε μία, δύο και σε όλες τις φάσεις, για διάφορες τιμές της αντίστασης γείωσης των πυλώνων. Εξετάζεται, επίσης, η επιρροή της κανονικής τάσης βιομηχανικής συχνότητας του δικτύου στον αριθμό των σφαλμάτων, η οποία δε φαίνεται να είναι σημαντική.



Σχήμα 5.1: Αλγοριθμική διαδικασία για τον υπολογισμό σφαλμάτων γραμμής

Σε αντίθεση με τις προσομοιώσεις και τις υπολογιστικές τεχνικές με τη χρήση υπολογιστικών πακέτων, η πειραματική παρατήρηση είναι πιο επίπονη και κοστοβόρα. Ο Carlos T. Mata [2] και οι συνεργάτες του από το πανεπιστήμιο της Φλόριντα κατασκεύασαν μια διάταξη από γραμμές διανομής 20kV, μήκους 829m, και τοποθέτησαν αλεξικέραυνα ανά τρεις πυλώνες, μετρώντας το ρεύμα που άγουν τα αλεξικέραυνα ανάλογα με τη θέση πτώσης του κεραυνού. Τα αλεξικέραυνα που ήταν πιο κοντά στο σημείο του κεραυνικού πλήγματος υπέστησαν τις σημαντικότερες καταπονήσεις, έχοντας μεγαλύτερες πιθανότητες καταστροφής.



Σχήμα 5.2: Κυματομορφές ρεύματος σε διάφορα σημεία των γραμμών

Οι Short και Ammon στο [3] εξέτασαν σε πραγματικές γραμμές των 13kV τον αριθμό των σφαλμάτων σε σχέση με το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέραυνων στη γραμμή. Οι μετρήσεις, για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μετρητές κεραυνών, οπτικοί και μαγνητικοί αισθητήρες και ειδικές κάμερες καταγραφής κεραυνών, πραγματοποιήθηκαν σε τρεις γραμμές των 13kV, όπου το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέραυνων ήταν 40m, 200m και 400m.

5.2.Εξίσωση κεραυνικού ρεύματος

Για την προσομοίωση του κεραυνικού πλήγματος, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση κεραυνικού ρεύματος [4]:

$$i(t) = \frac{I_0 \cdot \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \left(\frac{-\tau_2}{\tau_2 \cdot \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n+2}}}\right)}{\left(1 + \frac{t}{\tau_2}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_2 \cdot \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n+2}}}\right)}} \quad (5.1)$$

- όπου τ_1 είναι ο χρόνος μετώπου σε sec,
 τ_2 είναι ο χρόνος ημίσεως εύρους σε sec,
 I_0 είναι η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος σε A και
 n είναι συντελεστής με τιμή 7 [5]

Η τιμή του χρόνου μετώπου θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 10μsec, ενώ με κατάλληλη χρήση αλγορίθμου μεταβάλλαμε την τιμή του χρόνου ημίσεως εύρους από 20 ως 1000μsec. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος ήταν, επίσης, μια μεταβλητή παράμετρος που λάμβανε τιμές από 10 ως 300kA. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος δίνεται από τον τύπο [5]

$$f(I_p) = \frac{n_c}{I_{50}^{n_c}} \cdot \frac{I_p^{n_c-1}}{\left[1 + \left(\frac{I_p}{I_{50}}\right)^{n_c}\right]^2} \quad (5.2)$$

ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το χρόνο ημίσεως εύρους είναι

$$g(T_t) = \frac{n_t}{T_{50}^{n_t}} \cdot \frac{T_t^{n_t-1}}{\left[1 + \left(\frac{T_t}{T_{50}}\right)^{n_t}\right]^2} \quad (5.3)$$

Οι τιμές των I_{50} και T_{50} λήφθηκαν ίσες με 24kA και 30μsec αντίστοιχα, ενώ για τις σταθερές n_c και n_t έχουμε

$$n_c = 1.89 \quad \text{και} \quad n_t = 1.82$$

5.3.Πιθανότητα αστογίας αλεξικέραυνου

Οι Montanes και Garcia στο [6] δίνουν μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της πιθανότητας καταστροφής ενός αλεξικέραυνου ανάλογα με τη θέση του κεραυνικού πλήγματος. Τις ίδιες σχέσεις χρησιμοποιεί και ο Nakada με τους συνεργάτες του στο [7] για γραμμές διανομής μέσης τάσης. Την ίδια περίπου μεθοδολογία θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς στη μελέτη μας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι αγωγοί προστασίας τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να πλήττονται από τους κεραυνούς. Ένας αγωγός φάσης ή προστασίας έχει μια περιοχή, γύρω από την οποία μπορεί να δεχτεί κάποιο κεραυνικό πλήγμα. Η περιοχή αυτή είναι ένας κύκλος με ακτίνα c , η οποία ορίζεται ως κρίσιμη απόσταση, και κέντρο τους εκάστοτε αγωγούς. Στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων, υιοθετήσαμε τον υπολογισμό του IEEE Working Group[8] για την εύρεση της ακτίνας c που είναι

$$c = 8 \cdot I_p^{0.65} \quad (5.4)$$

Παρατηρούμε ότι η περιοχή προστασίας είναι ανάλογη κάθε φορά του μέγιστου ρεύματος.

Σύμφωνα με το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο του Σχήματος 5.3, ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} x^2 + (y - y_g)^2 &= c^2 \\ (x - d)^2 + (y - y_c)^2 &= c^2 \\ y &= \beta \cdot c \end{aligned} \quad (5.5)$$

όπου το β είναι ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας για τη διαφορετική έλξη μεταξύ αγωγού φάσης και γης και είναι ίσος με

$$\beta = 0.36 + 0.168 \cdot \log(43 - y_g) \quad (5.6)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι για δεδομένο μέγιστο κεραυνικό ρεύμα I_p , οι πιθανότητες ο κεραυνός να χτυπήσει τον αγωγό φάσης ή προστασίας είναι οι ακόλουθες:

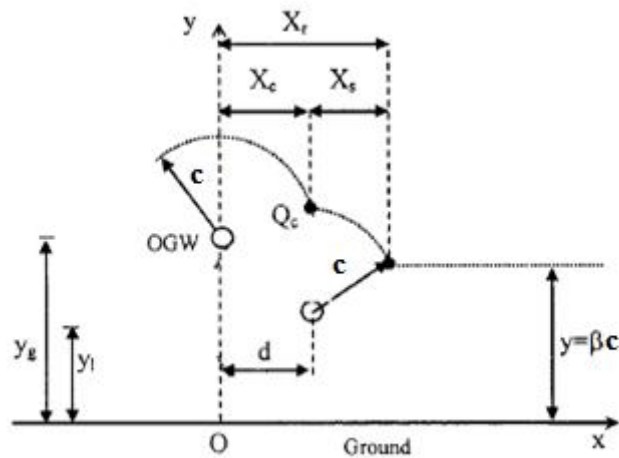
- Για τον αγωγό προστασίας:

$$h_g(I_p) = \frac{X_c}{X_r} \quad (5.7)$$

- Για τη γραμμή φάσης

$$h_l(I_p) = 1 - \frac{X_c}{X_r} \quad (5.8)$$

όπου τα X_c και X_r φαίνονται στο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο και βρίσκονται κατά την επίλυση των ανωτέρω εξισώσεων για δεδομένο I_p .



Σχήμα 5.3: Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο

Οι πιθανότητες, ο κεραυνός να πλήξει τη φάση ή τον αγωγό γης και να προκαλέσει καταστροφή του αλεξικέρανου, δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_A = \int_{T_r}^{\infty} \left\{ \int_{I_A(T_l)}^{\infty} f(I_p) \cdot h_A(I_p) dI_p \right\} g(T_l) dT_l \quad (5.9)$$

και

$$P_B = \int_{T_r}^{\infty} \left\{ \int_{I_B(T_l)}^{\infty} f(I_p) \cdot h_B(I_p) dI_p \right\} g(T_l) dT_l \quad (5.10)$$

όπου P_A η πιθανότητα αστοχίας του αλεξικέρανου, όταν ο κεραυνός πλήξει τον αγωγό φάσης,

P_B η πιθανότητα αστοχίας του αλεξικέρανου, όταν ο κεραυνός πλήξει τον αγωγό γης,

$I_A(T_l)$ το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα που απαιτείται για την καταστροφή του αλεξικέρανου, όταν ο κεραυνός πλήξει τον αγωγό φάσης,

$I_B(T_l)$ το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα που απαιτείται για την καταστροφή του αλεξικέρανου, όταν ο κεραυνός πλήξει τον αγωγό προστασίας,

$f(I_p)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και

$g(T_l)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το χρόνο ημίσειας εύρους.

Η συνολική πιθανότητα καταστροφής του αλεξικέραυνου είναι το άθροισμα των δύο ανωτέρω πιθανοτήτων, δηλαδή

$$P_F = P_A + P_B \quad (5.11)$$

5.4.Ενέργεια αλεξικέραυνου

Η απορροφούμενη από το αλεξικέραυνο ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

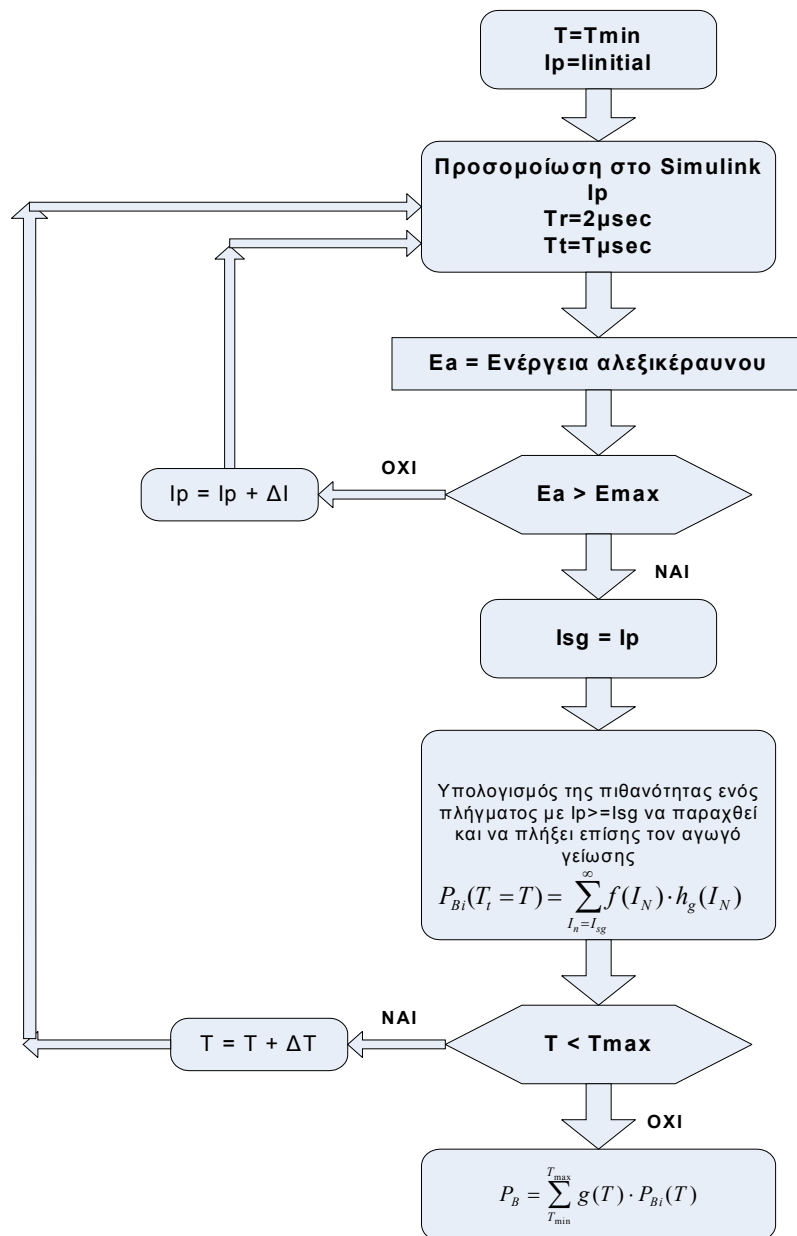
$$E = \int_{t_0}^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (5.12)$$

όπου: $u(t)$ είναι η παραμένουσα τάση του αλεξικέραυνου σε kV και

$i(t)$ είναι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από το αλεξικέραυνο σε kA

5.5.Αλγόριθμος για τον υπολογισμό σφαλμάτων

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας του αλεξικέραυνου για ένα εύρος κεραυνικών ρευμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος, ο μηχανισμός του οποίου φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 5.4: Block διάγραμμα αλγόριθμου

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα σφάλματος υπολογίζεται για το αλεξικέραυνο εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο που πέφτει ο κεραυνός, γιατί στο σημείο αυτό θα έχουμε και τη χειρίστη πιθανότητα.

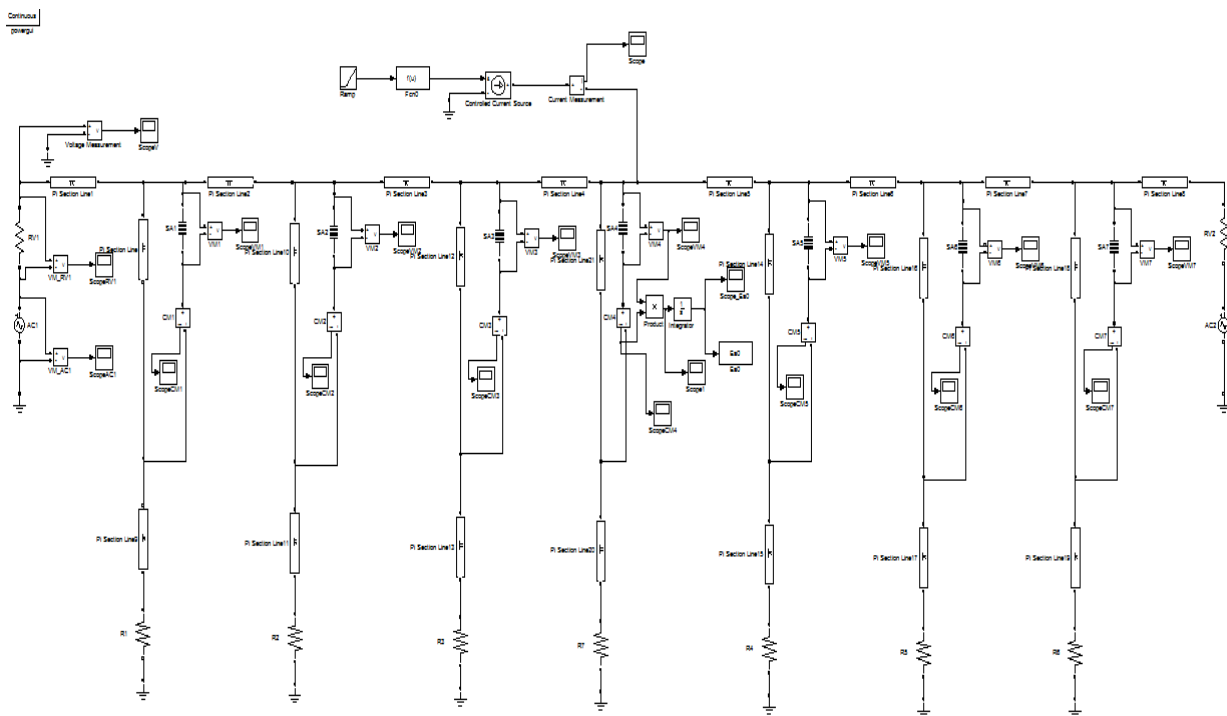
5.6. Προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος σε γραμμή μεταφοράς και υπολογισμός σφάλματος αλεξικέραυνου

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink, ενώ ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Matlab.

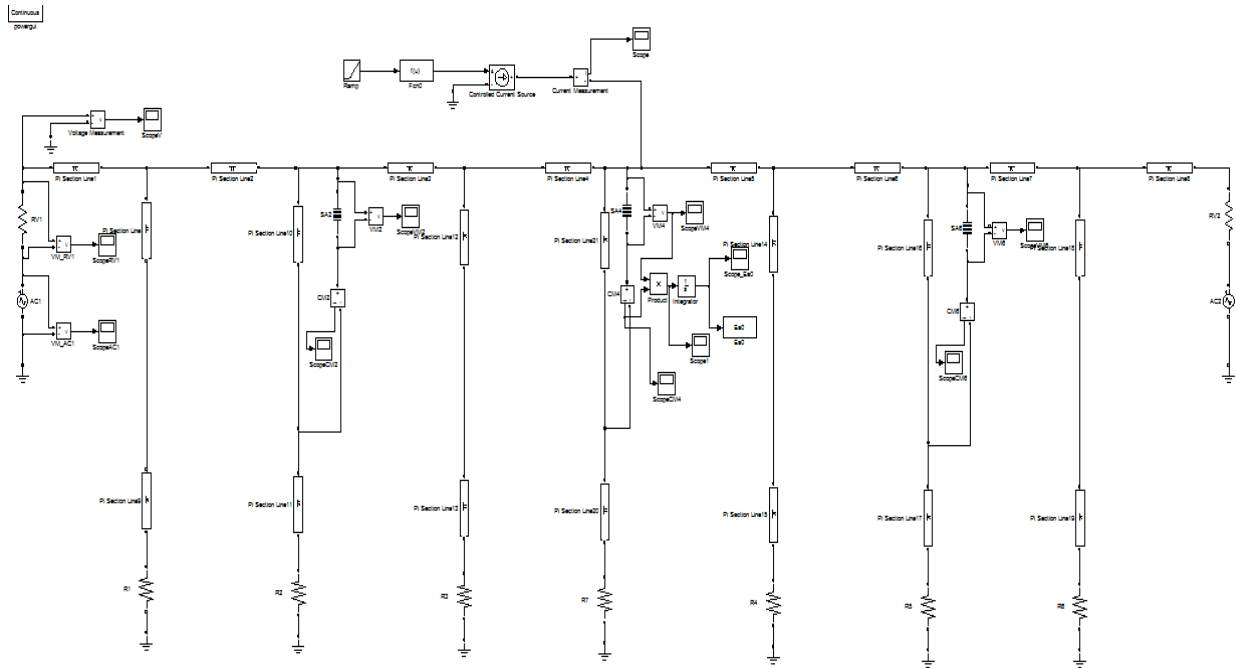
5.6.1. Προσομοίωση για άμεσο κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης

Στην παρούσα εργασία, εξετάσαμε τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης αλεξικέραυνων σε γραμμές μεταφοράς. Αρχικά, τοποθετήσαμε αλεξικέραυνα σε κάθε πυλώνα, κατόπιν τα αλεξικέραυνα τοποθετήθηκαν ανά ένα πυλώνα και τέλος, εξετάστηκε και η περίπτωση τοποθέτησης ανά δυο πυλώνες. Επίσης, δοκιμάσαμε αλεξικέραυνα ενέργειας 400kJ και αλεξικέραυνα 700kJ.

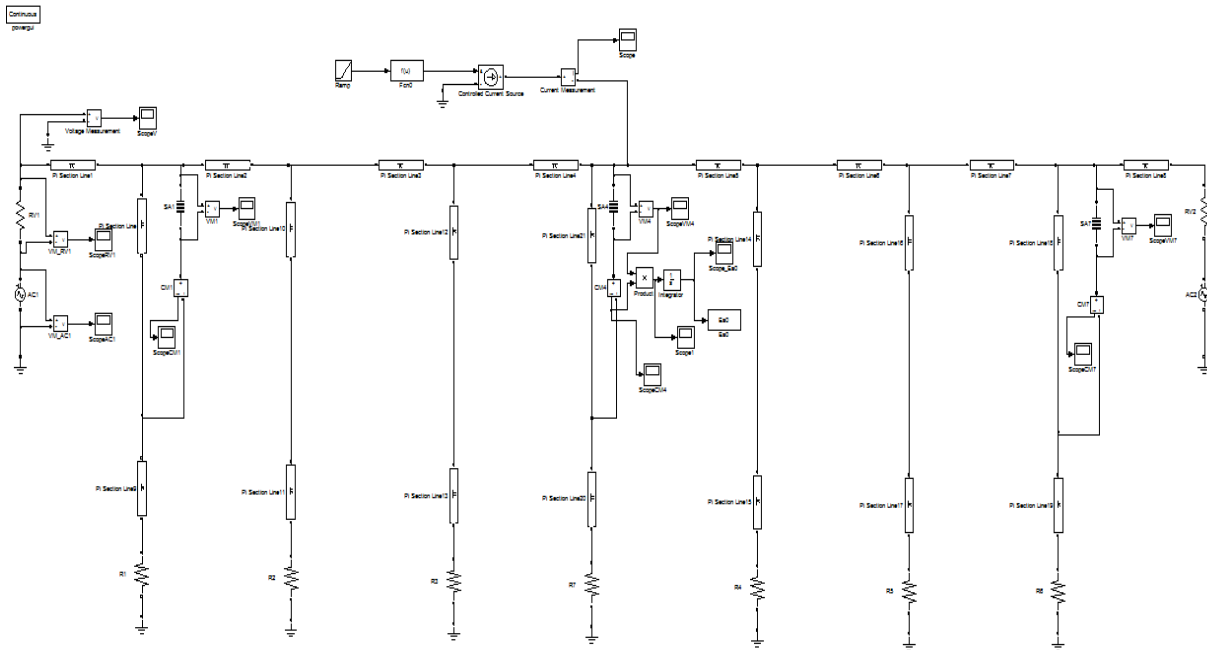
Τα κυκλώματα, στα οποία εκτελέστηκε η προσομοίωση, αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς σε σειρά, ανάμεσα στις οποίες είναι τοποθετημένοι πυλώνες και αλεξικέραυνα. Οι πυλώνες, ύψους 21m (βλέπε Σχήμα 3.1), είναι προσομοιωμένοι με Pi Section Lines με κυματική αντίσταση 200Ω, ενώ οι γραμμές μεταφοράς προσομοιώνονται με Pi Section Lines με κυματική αντίσταση 400Ω για τους αγωγούς φάσης και 700Ω για τους αγωγούς προστασίας [6]. Σε όλο το κύκλωμα έχουν τοποθετηθεί μετρητές ρεύματος και τάσης για έλεγχο των αποτελεσμάτων. Η διάταξη για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.5: Γραμμή μεταφοράς με αλεξικέραυνα τοποθετημένα σε κάθε πυλώνα



Σχήμα 5.6: Γραμμή μεταφοράς με αλεξικέραυνα τοποθετημένα ανά ένα πυλώνα



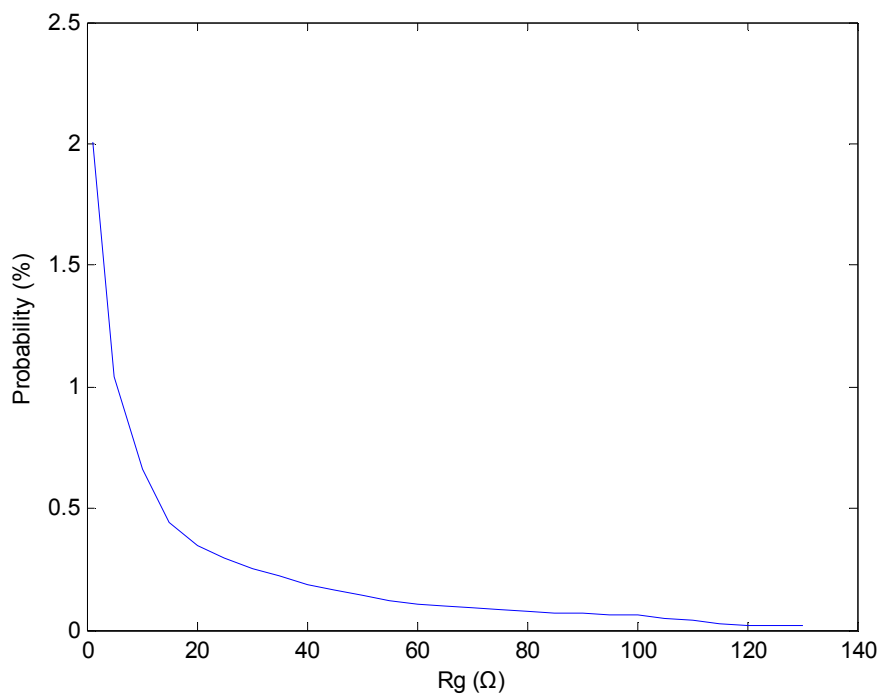
Σχήμα 5.7: Γραμμή μεταφοράς με αλεξικέραυνα τοποθετημένα ανά δύο πυλώνες

Οι πιθανότητες καταστροφής των αλεξικέραυνων, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση, φαίνονται παρακάτω:

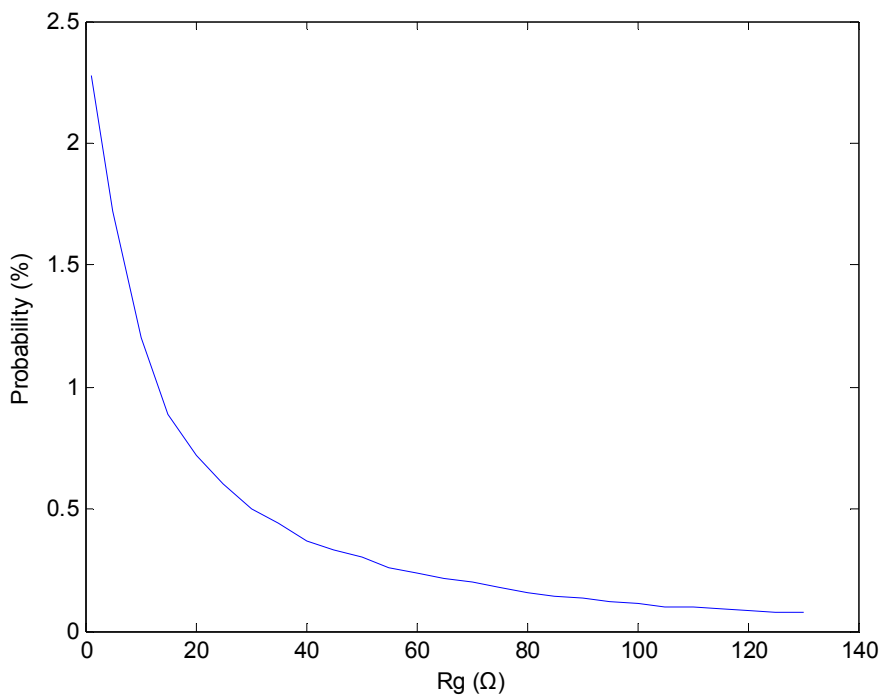
| R | 400kJ | | | 700kJ | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P0 | P1 | P2 | P0 | P1 | P2 |
| 1 | 2,010% | 2,280% | 2,280% | 0,810% | 0,980% | 0,980% |
| 5 | 1,040% | 1,720% | 1,800% | 0,340% | 0,600% | 0,720% |
| 10 | 0,660% | 1,200% | 1,480% | 0,190% | 0,400% | 0,530% |
| 15 | 0,440% | 0,890% | 1,170% | 0,127% | 0,275% | 0,463% |
| 20 | 0,350% | 0,720% | 1,000% | 0,100% | 0,220% | 0,402% |
| 25 | 0,295% | 0,600% | 0,880% | 0,085% | 0,185% | 0,344% |
| 30 | 0,255% | 0,500% | 0,775% | 0,073% | 0,160% | 0,287% |
| 35 | 0,220% | 0,440% | 0,675% | 0,063% | 0,135% | 0,235% |
| 40 | 0,190% | 0,370% | 0,580% | 0,055% | 0,115% | 0,190% |
| 45 | 0,163% | 0,330% | 0,500% | 0,047% | 0,092% | 0,150% |
| 50 | 0,140% | 0,300% | 0,430% | 0,040% | 0,082% | 0,120% |
| 55 | 0,120% | 0,260% | 0,374% | 0,034% | 0,070% | 0,098% |
| 60 | 0,108% | 0,238% | 0,328% | 0,030% | 0,060% | 0,085% |
| 65 | 0,100% | 0,217% | 0,294% | 0,026% | 0,055% | 0,075% |
| 70 | 0,092% | 0,198% | 0,265% | 0,024% | 0,050% | 0,067% |
| 75 | 0,086% | 0,178% | 0,238% | 0,022% | 0,048% | 0,061% |
| 80 | 0,080% | 0,160% | 0,210% | 0,020% | 0,042% | 0,056% |
| 85 | 0,071% | 0,145% | 0,186% | 0,017% | 0,038% | 0,052% |
| 90 | 0,067% | 0,132% | 0,170% | 0,016% | 0,035% | 0,047% |
| 95 | 0,063% | 0,120% | 0,162% | 0,016% | 0,031% | 0,045% |
| 100 | 0,060% | 0,110% | 0,150% | 0,015% | 0,030% | 0,038% |
| 105 | 0,050% | 0,100% | 0,138% | 0,012% | 0,023% | 0,030% |
| 110 | 0,039% | 0,096% | 0,129% | 0,010% | 0,015% | 0,020% |
| 115 | 0,029% | 0,090% | 0,120% | 0,005% | 0,007% | 0,010% |
| 120 | 0,020% | 0,085% | 0,110% | 0,004% | 0,002% | 0,003% |
| 125 | 0,018% | 0,080% | 0,103% | 0,003% | 0,002% | 0,002% |
| 130 | 0,018% | 0,076% | 0,097% | 0,003% | 0,001% | 0,001% |

Σχήμα 5.8: Πίνακας πιθανοτήτων αστοχίας αλεξικέραυνου για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα (P0), ανά ένα πυλώνα (P1) και ανά δύο πυλώνες (P2)

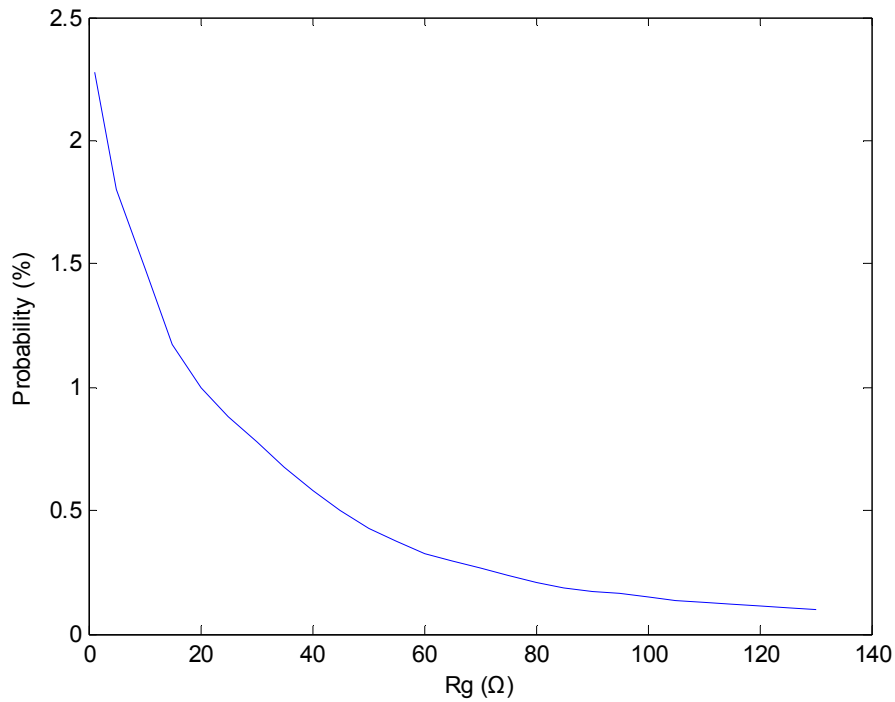
Οι γραφικές απεικονίσεις των πιθανοτήτων σε σχέση με τις εκάστοτε αντιστάσεις γείωσης φαίνονται παρακάτω:



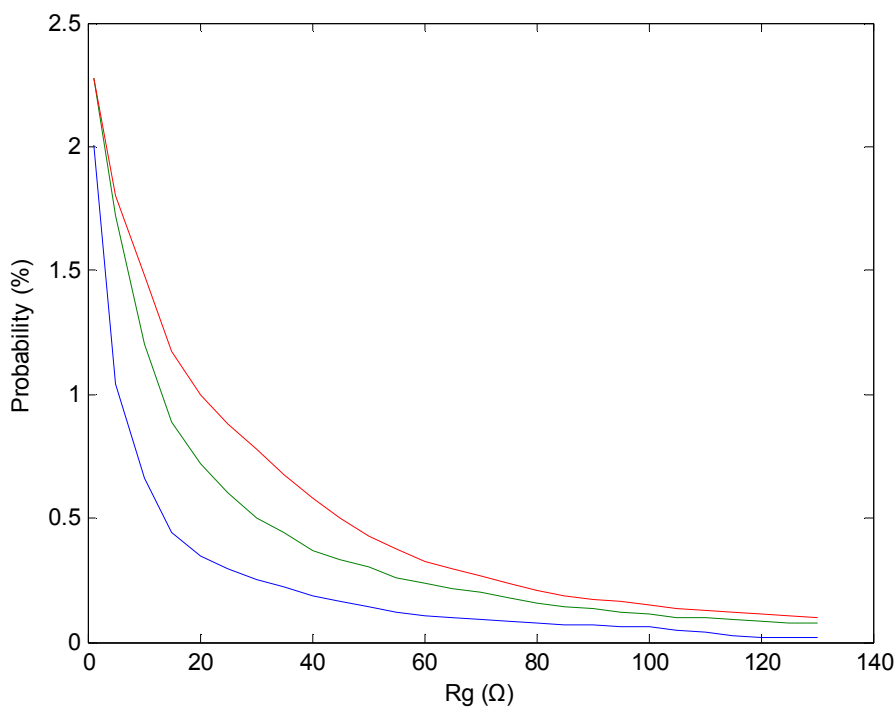
Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραννου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραννων σε κάθε πυλώνα



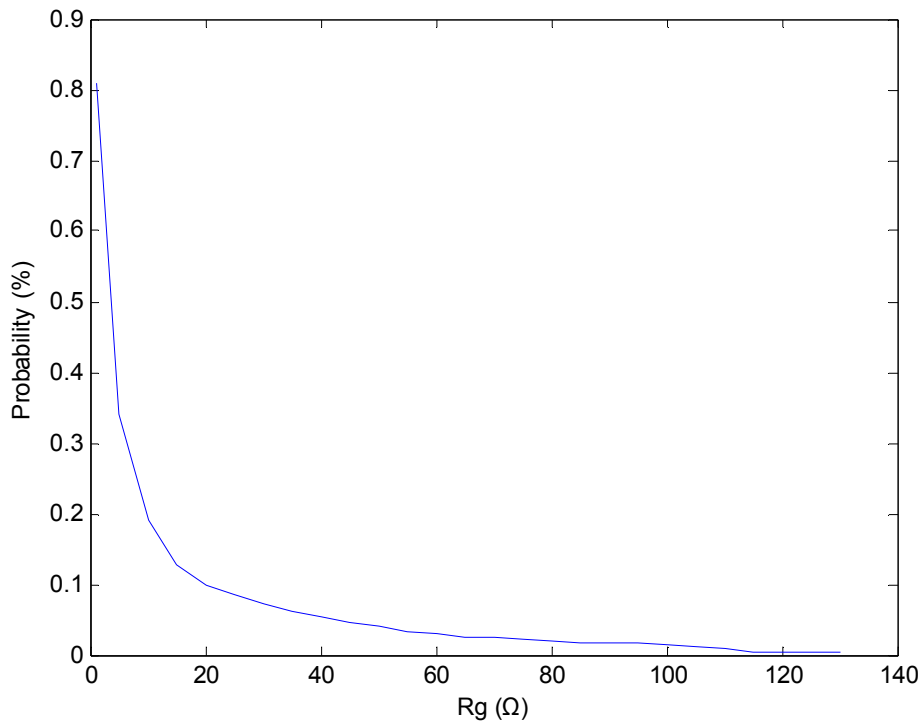
Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραννου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραννων ανά ένα πυλώνα



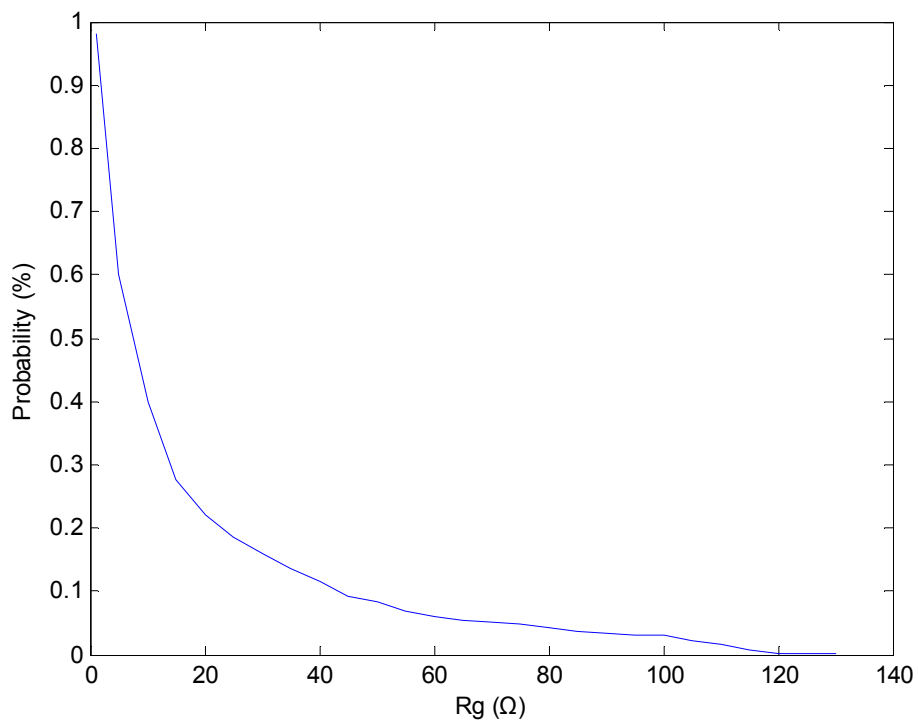
Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέρανου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέρανων ανά δύο πυλώνες



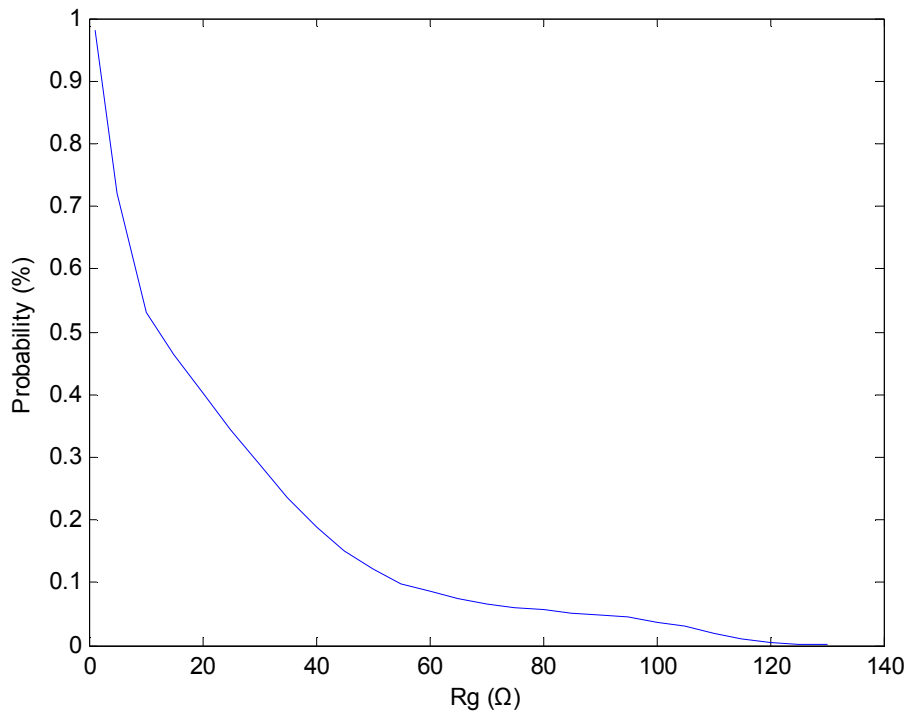
Σχήμα 5.12: Συνολική γραφική παράσταση των πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέρανου 400kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέρανων (μπλε: σε κάθε πυλώνα, πράσινο: ανά ένα πυλώνα, κόκκινο: ανά δύο πυλώνες)



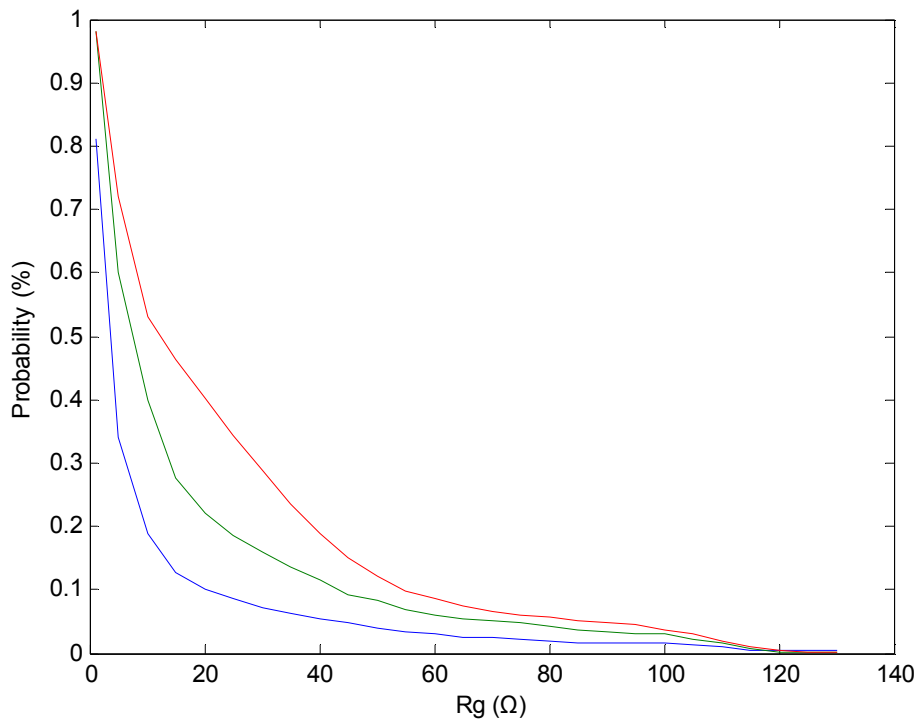
Σχήμα 5.13: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα



Σχήμα 5.14: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά ένα πυλώνα



Σχήμα 5.15: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά δύο πυλώνες



Σχήμα 5.16: Συνολική γραφική παράσταση των πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέραυνου 700kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέραυνων (μπλε: σε κάθε πυλώνα, πράσινο: ανά ένα πυλώνα, κόκκινο: ανά δύο πυλώνες)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα και τις γραφικές παραστάσεις μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

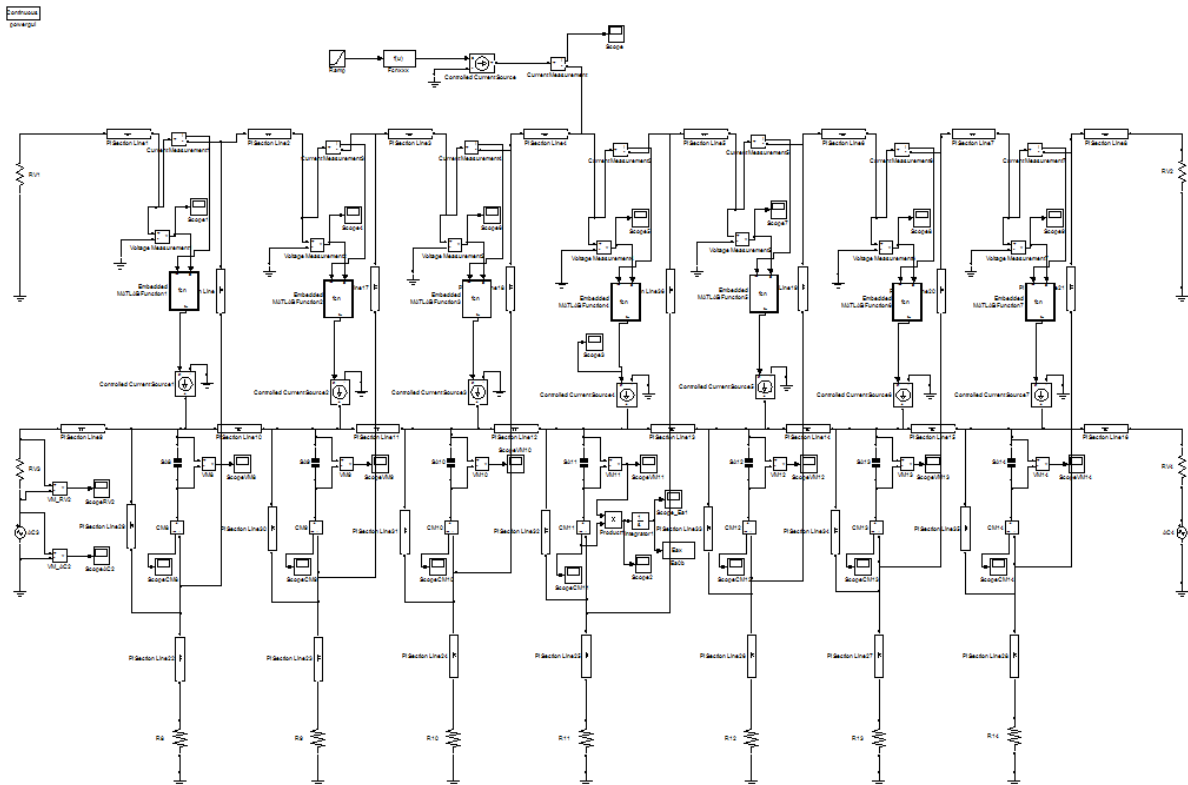
- α) Η πιθανότητα καταστροφής του αλεξικέρανου μειώνεται, όσο αυξάνεται η αντίσταση γείωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί όσο αυξάνεται η αντίσταση, τόσο λιγότερο ρεύμα διαπερνά το αλεξικέρανο.
- β) Για την ίδια αντίσταση γείωσης, η πιθανότητα καταστροφής του αλεξικέρανου αυξάνεται, όσο πιο αραιά γίνεται η τοποθέτηση των αλεξικέρανων στους πυλώνες. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς όσο περισσότερα αλεξικέρανα υπάρχουν, τόσο περισσότερο θα καταμεριστεί το ρεύμα, με συνέπεια να περνάει λιγότερο ρεύμα από κάθε αλεξικέρανο.
- γ) Τέλος, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η ενέργεια αντοχής του αλεξικέρανου, τόσο μειώνεται η πιθανότητα καταστροφής του, καθώς το αλεξικέρανο μπορεί να αντέξει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και να επανέλθει στην φυσιολογική του κατάσταση χωρίς να έχει υποστεί μόνιμη βλάβη.

5.6.2.Προσομοίωση για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό γης

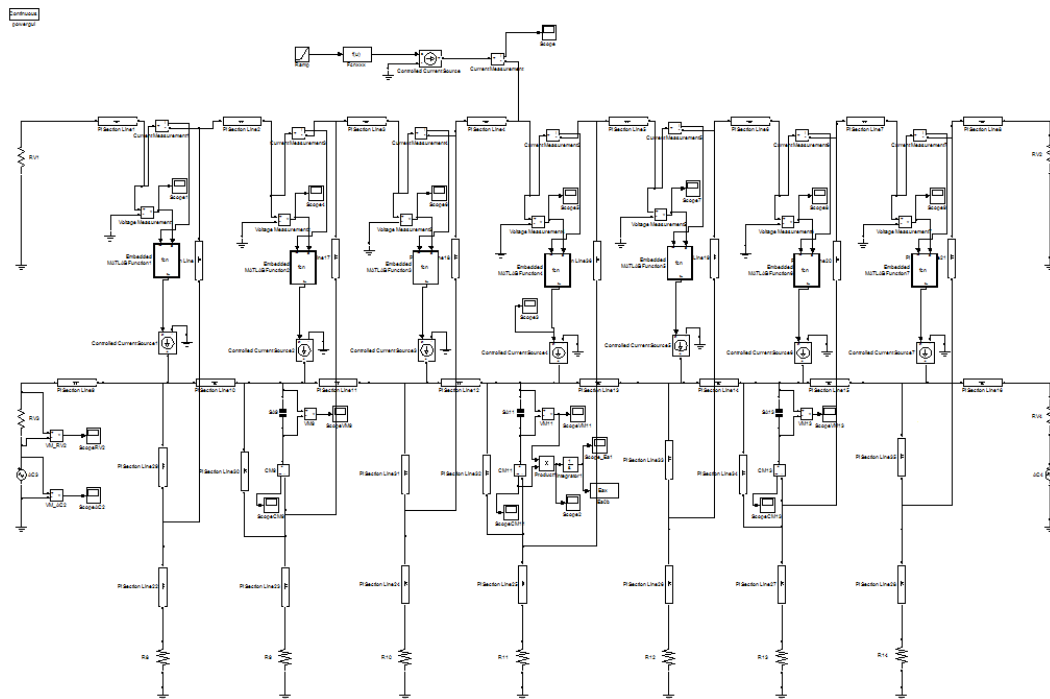
Για γραμμές που προστατεύονται από αγωγό γης, η ανάστροφη διάσπαση είναι η κύρια αιτία σφαλμάτων και διακοπών, ιδίως στους πυλώνες με υψηλή αντίσταση γείωσης. Η πιθανότητα διάσπασης σε αυτές τις περιπτώσεις μειώνεται με την τοποθέτηση αλεξικέρανων σε όλες τις φάσεις και σε όλους τους πυλώνες (η περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα ακριβή λύση, γι' αυτό τα αλεξικέρανα εγκαθίστανται ανά ορισμένο βήμα πυλώνων ανάλογα με την αντίσταση γείωσης). Αστοχία ενός αλεξικέρανου μπορεί να προκληθεί από πλήγμα στον αγωγό φάσης, αλλά η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο είναι μικρή. Έτσι, η ανάστροφη διάσπαση είναι ο κύριος παράγοντας για τον υπολογισμό του αριθμού σφαλμάτων του αλεξικέρανου. Τα αλεξικέρανα που τοποθετούνται μεταξύ φάσης και γης αυξάνουν το «κρίσιμο» ρεύμα πάνω από το οποίο συμβαίνει διάσπαση της μόνωσης, οπότε μειώνουν, έτσι, τον αριθμό σφαλμάτων της γραμμής.

Ανάλογα με τα προηγούμενα μοντέλα για κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης, δημιουργήθηκαν και μοντέλα για πλήγμα σε αγωγό προστασίας. Η διαφορά έγκειται στο ότι προσθέσαμε έναν αγωγό γείωσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, ο οποίος συνδέεται με το υπόλοιπο κύκλωμα και τον πυλώνα στην αντίσταση γείωσης. Η σύνδεση αυτή έγινε μέσω διακοπών που τοποθετήθηκαν μεταξύ φάσης και αγωγού προστασίας, οι οποίοι κλείνουν, όταν η μετρούμενη τάση μεταξύ φάσης και αγωγού προστασίας ξεπεράσει τη στάθμη μόνωσης των 750kV. Και για αυτή την περίπτωση μελετήσαμε τις παραπάνω τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης αλεξικέρανων για τοποθέτηση αλεξικέρανων 400kJ και 700kJ.

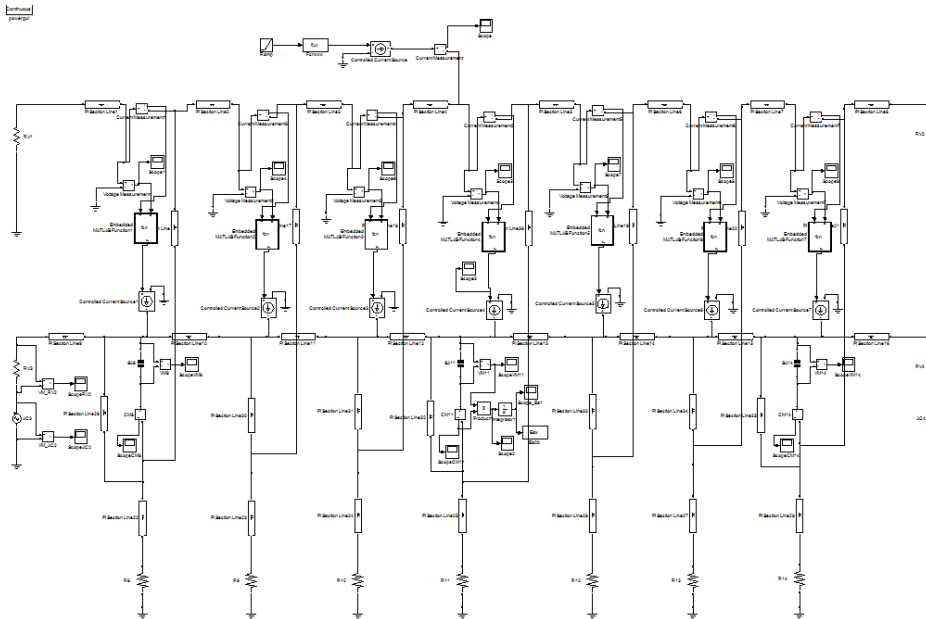
Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αυτή είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.17: Γραμμή μεταφοράς (με αγωγό προστασίας) με αλεξικέραυνα τοποθετημένα σε κάθε πυλώνα



Σχήμα 5.18: Γραμμή μεταφοράς (με αγωγό προστασίας) με αλεξικέραυνα τοποθετημένα ανά ένα πυλώνα



Σχήμα 5.19: Γραμμή μεταφοράς (με αγωγό προστασίας) με αλεξικέραυνα τοποθετημένα ανά δύο πυλώνες

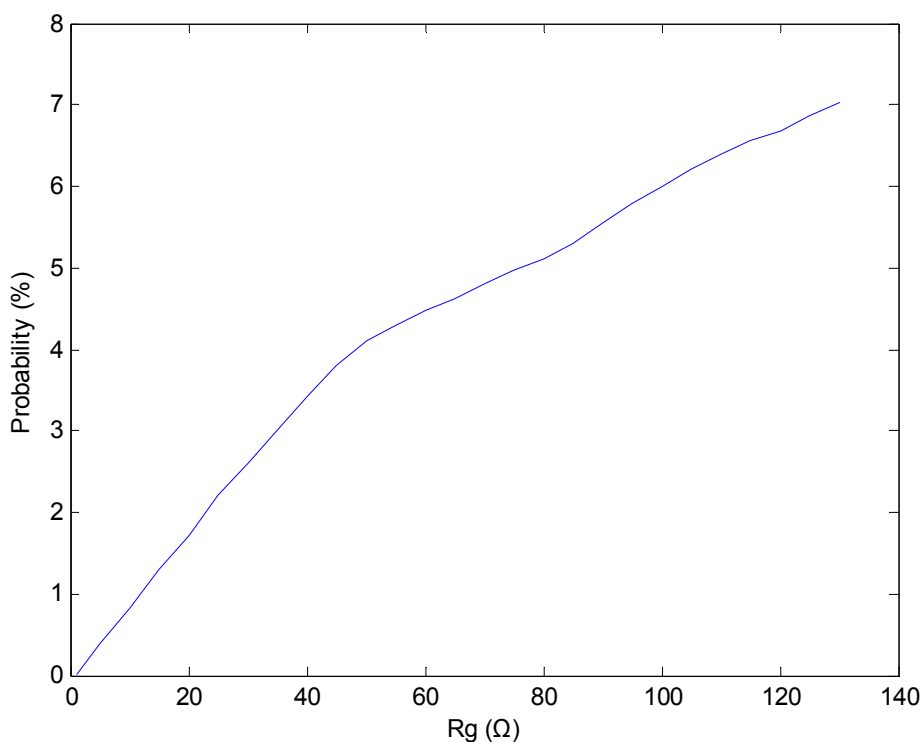
Οι πιθανότητες καταστροφής των αλεξικέραυνων, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση, φαίνονται παρακάτω:

| R | 400kJ | | | 700kJ | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P0 | P1 | P2 | P0 | P1 | P2 |
| 1 | 0,016% | 0,036% | 0,037% | 0,003% | 0,008% | 0,009% |
| 5 | 0,380% | 0,683% | 0,750% | 0,004% | 0,015% | 0,014% |
| 10 | 0,820% | 1,400% | 1,480% | 0,012% | 0,067% | 0,082% |
| 15 | 1,300% | 2,100% | 2,320% | 0,045% | 0,103% | 0,117% |
| 20 | 1,720% | 2,680% | 2,710% | 0,083% | 0,158% | 0,186% |
| 25 | 2,200% | 2,730% | 2,800% | 0,104% | 0,180% | 0,200% |
| 30 | 2,600% | 2,900% | 2,930% | 0,127% | 0,214% | 0,235% |
| 35 | 3,000% | 3,220% | 3,300% | 0,189% | 0,275% | 0,280% |
| 40 | 3,420% | 3,650% | 3,760% | 0,216% | 0,306% | 0,310% |
| 45 | 3,810% | 4,010% | 4,190% | 0,250% | 0,362% | 0,379% |
| 50 | 4,100% | 4,420% | 4,490% | 0,275% | 0,390% | 0,402% |
| 55 | 4,300% | 4,500% | 4,560% | 0,302% | 0,422% | 0,450% |
| 60 | 4,480% | 4,570% | 4,620% | 0,327% | 0,461% | 0,478% |
| 65 | 4,630% | 4,810% | 4,980% | 0,362% | 0,489% | 0,507% |
| 70 | 4,800% | 4,930% | 5,060% | 0,384% | 0,500% | 0,532% |
| 75 | 4,960% | 5,030% | 5,200% | 0,415% | 0,540% | 0,588% |
| 80 | 5,100% | 5,170% | 5,370% | 0,467% | 0,587% | 0,605% |
| 85 | 5,300% | 5,420% | 5,540% | 0,520% | 0,610% | 0,620% |
| 90 | 5,550% | 5,600% | 5,780% | 0,603% | 0,643% | 0,657% |

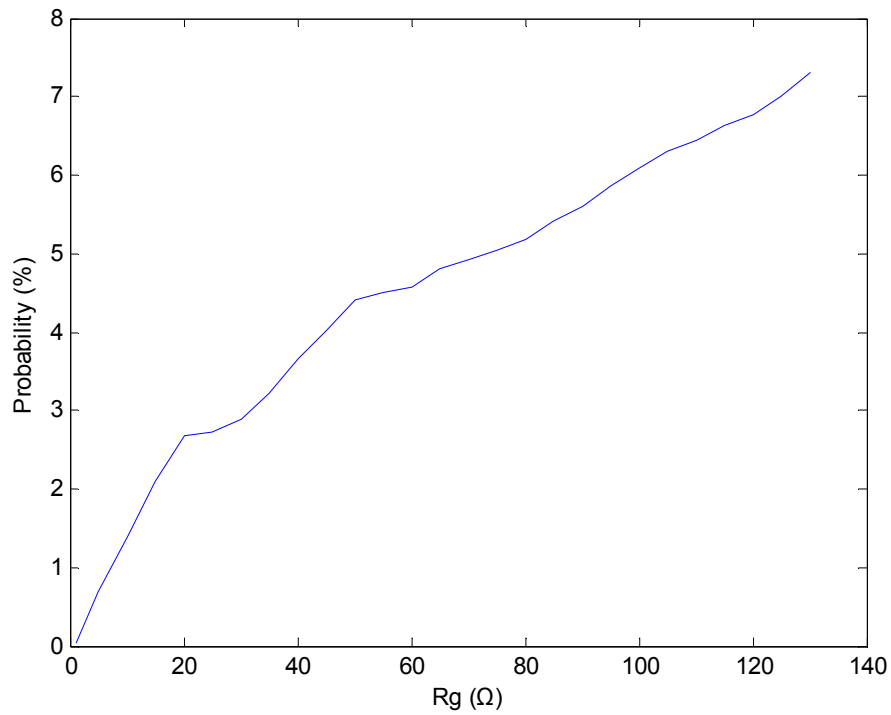
| | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 95 | 5,800% | 5,860% | 5,920% | 0,652% | 0,688% | 0,715% |
| 100 | 6,000% | 6,100% | 6,230% | 0,698% | 0,724% | 0,738% |
| 105 | 6,200% | 6,300% | 6,470% | 0,722% | 0,745% | 0,767% |
| 110 | 6,390% | 6,450% | 6,540% | 0,734% | 0,783% | 0,810% |
| 115 | 6,560% | 6,620% | 6,700% | 0,815% | 0,850% | 0,878% |
| 120 | 6,680% | 6,780% | 6,850% | 0,847% | 0,900% | 0,932% |
| 125 | 6,870% | 7,010% | 7,120% | 0,878% | 0,967% | 0,980% |
| 130 | 7,030% | 7,320% | 7,410% | 0,907% | 1,100% | 1,107% |

Σχήμα 5.20: Πίνακας πιθανοτήτων αστοχίας αλεξικέραυνου για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα (P0), ανά ένα πυλώνα (P1) και ανά δύο πυλώνες (P2)

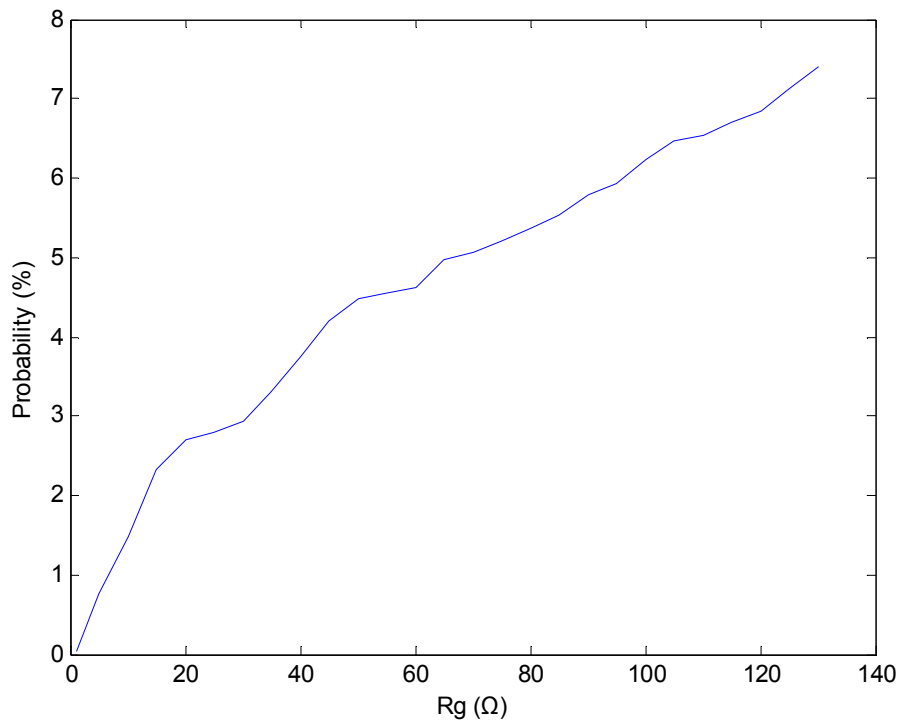
Οι γραφικές απεικονίσεις των πιθανοτήτων σε σχέση με τις εκάστοτε αντιστάσεις γείωσης φαίνονται παρακάτω:



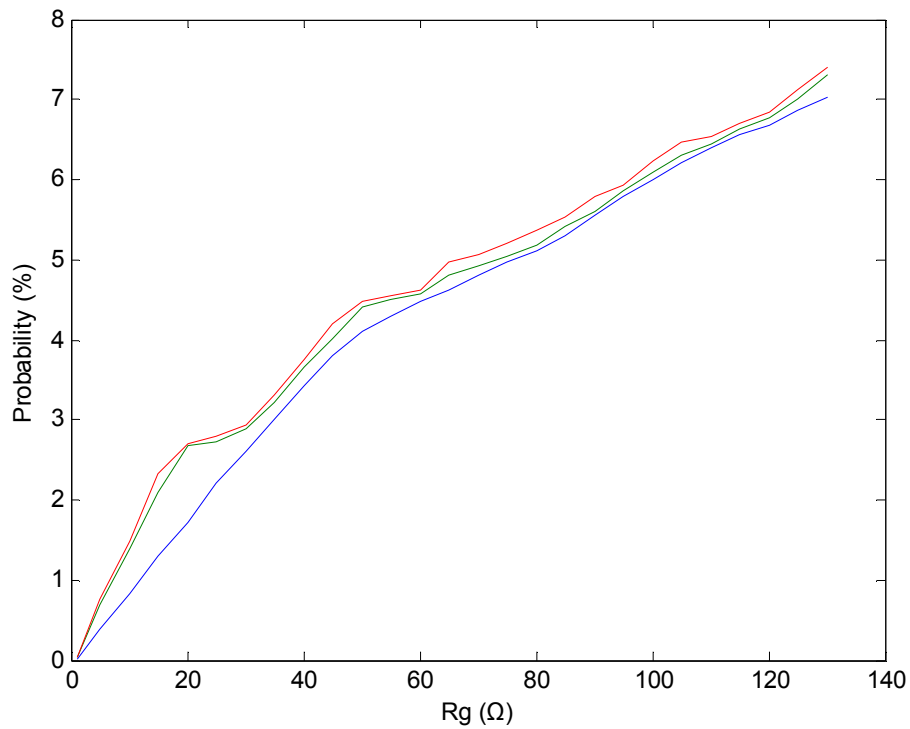
Σχήμα 5.21: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα



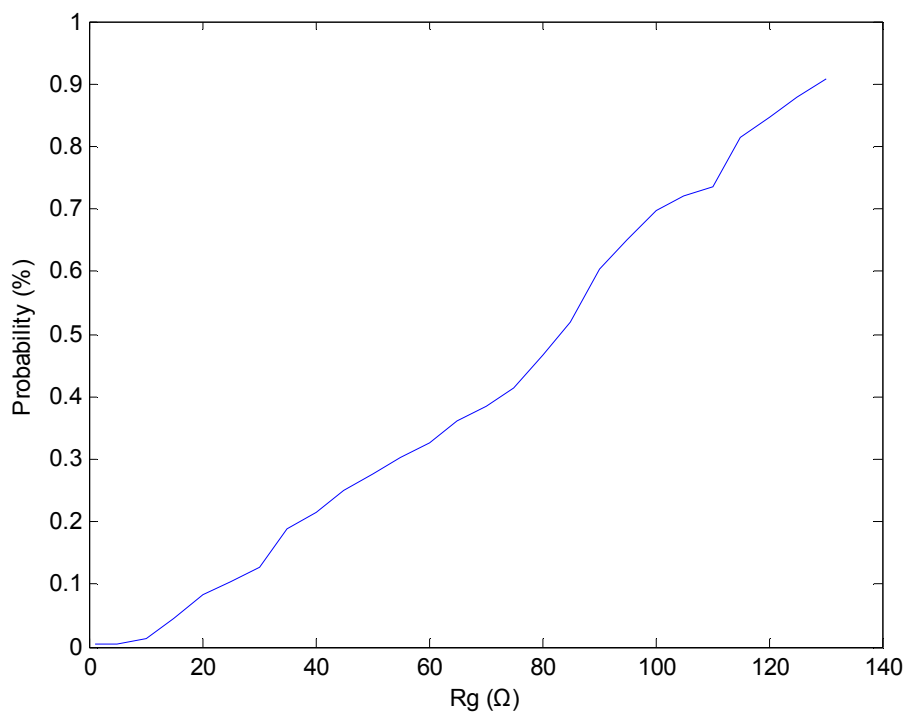
Σχήμα 5.22: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά ένα πυλώνα



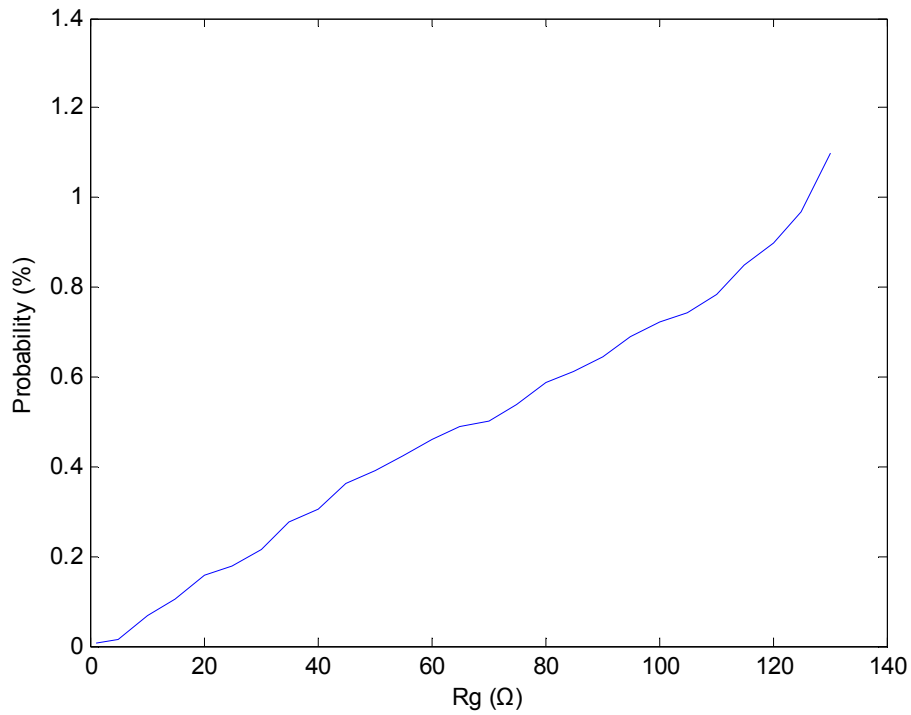
Σχήμα 5.23: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά δύο πυλώνες



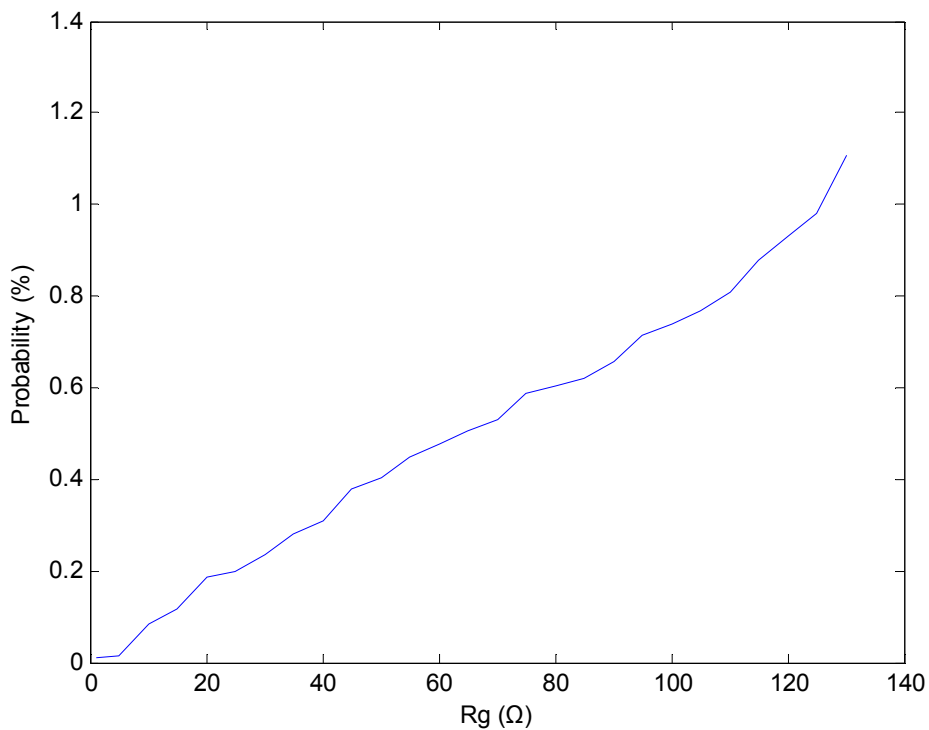
Σχήμα 5.24: Συνολική γραφική παράσταση των πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέρανου 400kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέρανων (μπλε: σε κάθε πυλώνα, πράσινο: ανά ένα πυλώνα, κόκκινο: ανά δύο πυλώνες)



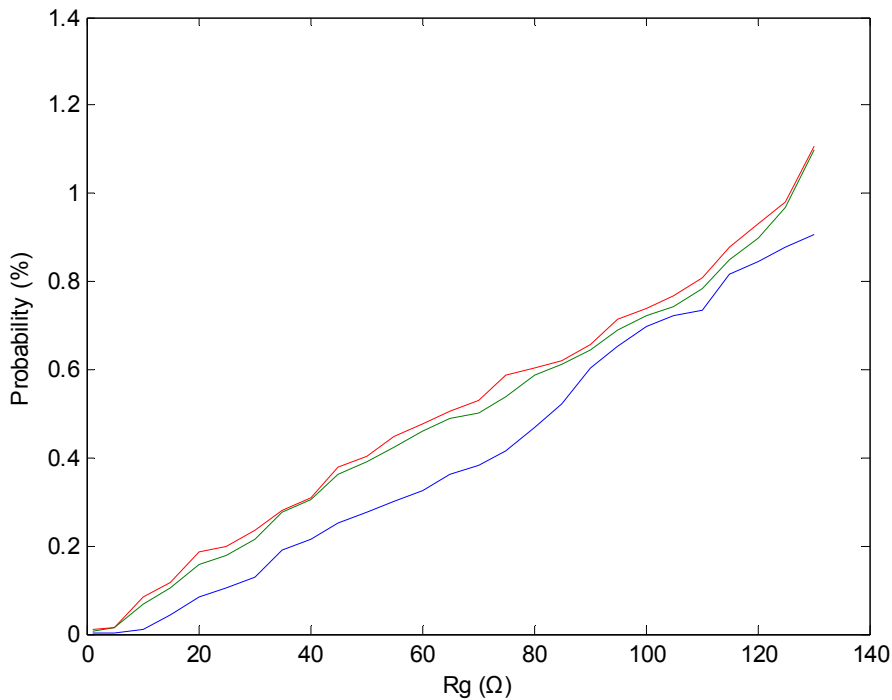
Σχήμα 5.25: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέρανου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέρανων σε κάθε πυλώνα



Σχήμα 5.26: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέρανου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέρανων ανά ένα πλώνα



Σχήμα 5.27: Γραφική παράσταση πιθανότητας καταστροφής του αλεξικέρανου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέρανων ανά δύο πλώνες

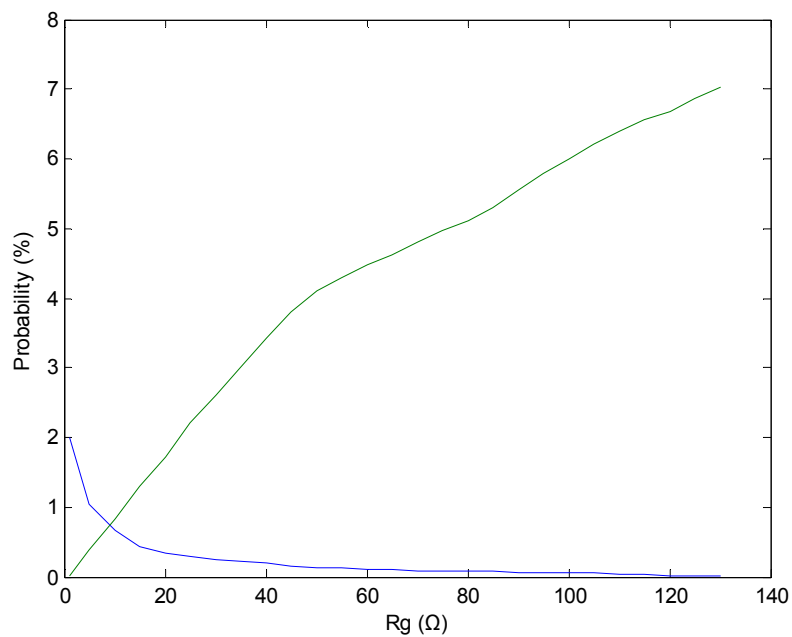


Σχήμα 5.28: Συνολική γραφική παράσταση των πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέρανου 700kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέρανων (μπλε: σε κάθε πυλώνα, πράσινο: ανά ένα πυλώνα, κόκκινο: ανά δύο πυλώνες)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα και τις γραφικές παραστάσεις μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

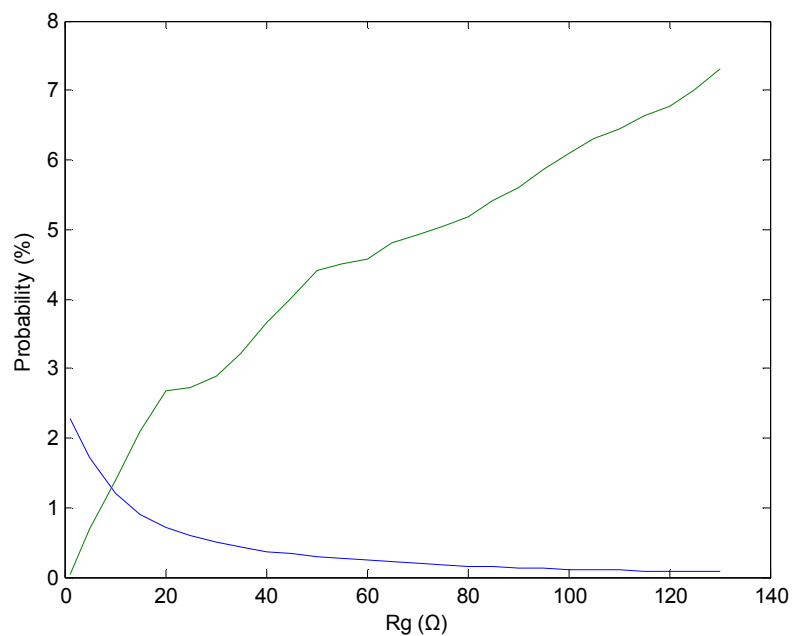
- α) Η πιθανότητα καταστροφής του αλεξικέρανου αυξάνεται, όσο αυξάνεται η αντίσταση γείωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση γείωσης, τόσο πιο πιθανό είναι να συμβεί ανάστροφη διάσπαση μεταξύ του αγωγού γείωσης και του αγωγού φάσης.
- β) Για την ίδια αντίσταση γείωσης, η πιθανότητα καταστροφής του αλεξικέρανου αυξάνεται, όσο πιο αραιά γίνεται η τοποθέτηση των αλεξικέρανων στους πυλώνες. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς όσο περισσότερα αλεξικέρανα υπάρχουν, τόσο περισσότερο θα καταμεριστεί το ρεύμα, με συνέπεια να περνάει λιγότερο ρεύμα από κάθε αλεξικέρανο.
- γ) Τέλος, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η ενέργεια αντοχής του αλεξικέρανου, τόσο μειώνεται η πιθανότητα καταστροφής του, καθώς το αλεξικέρανο μπορεί να αντέξει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και να επανέλθει στην φυσιολογική του κατάσταση χωρίς να έχει υποστεί μόνιμη βλάβη.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των πιθανοτήτων αστοχίας του αλεξικέραυνου για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης και στον αγωγό γείωσης.



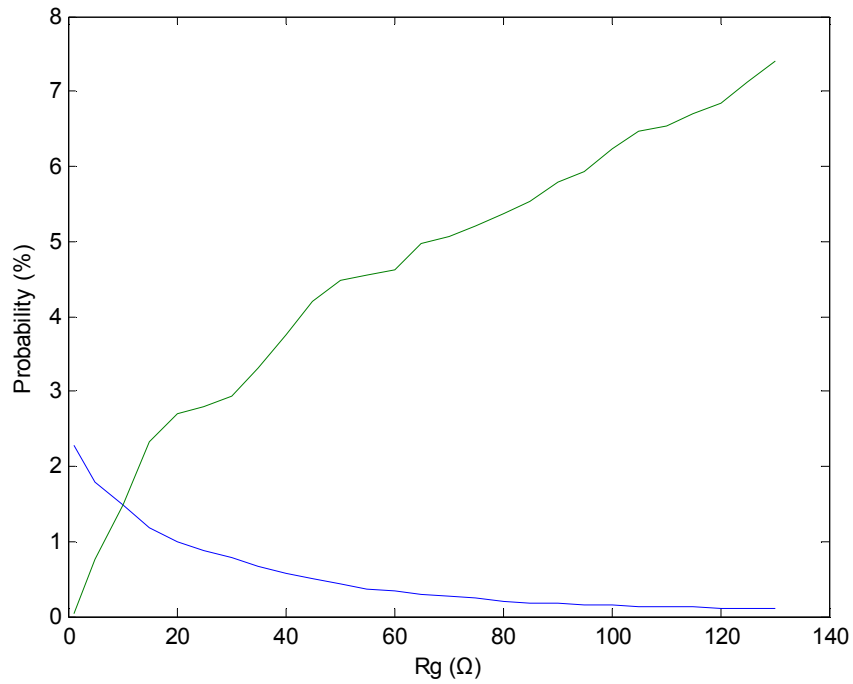
Σχήμα 5.29: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]



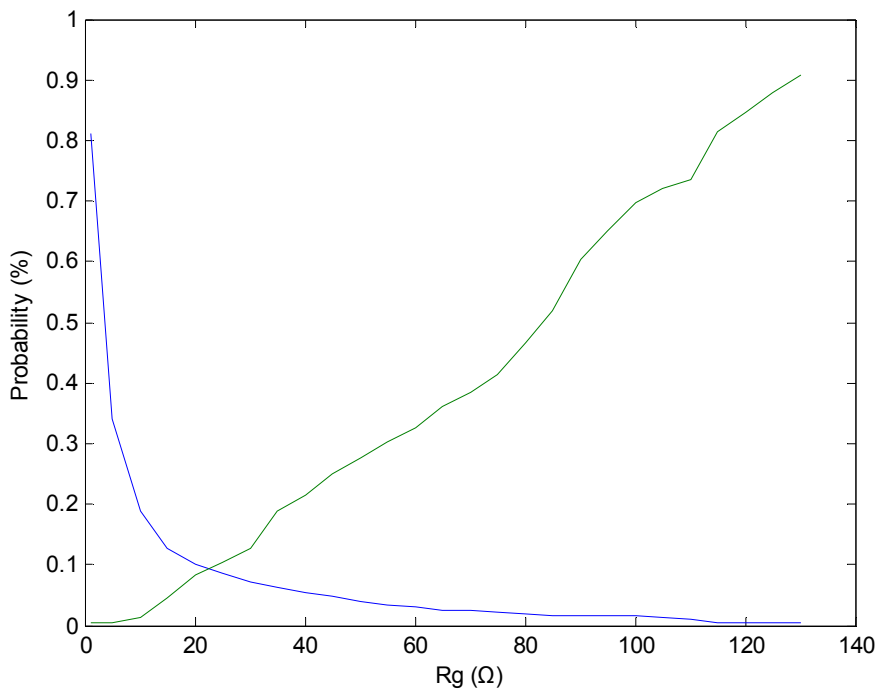
Σχήμα 5.30: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά ένα πυλώνα

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]



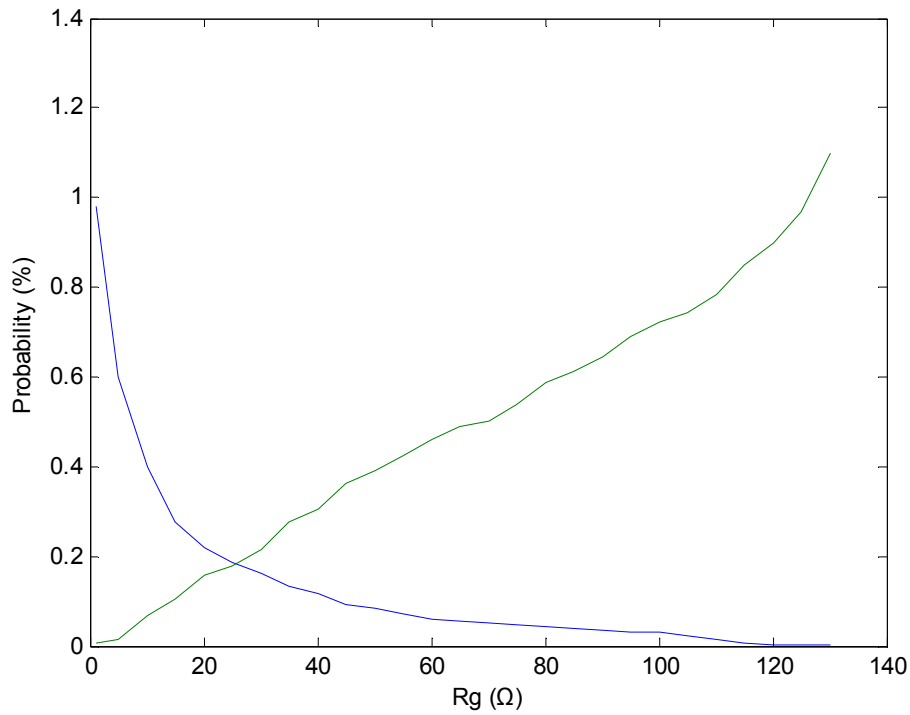
Σχήμα 5.31: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 400kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά δύο πυλώνες

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]



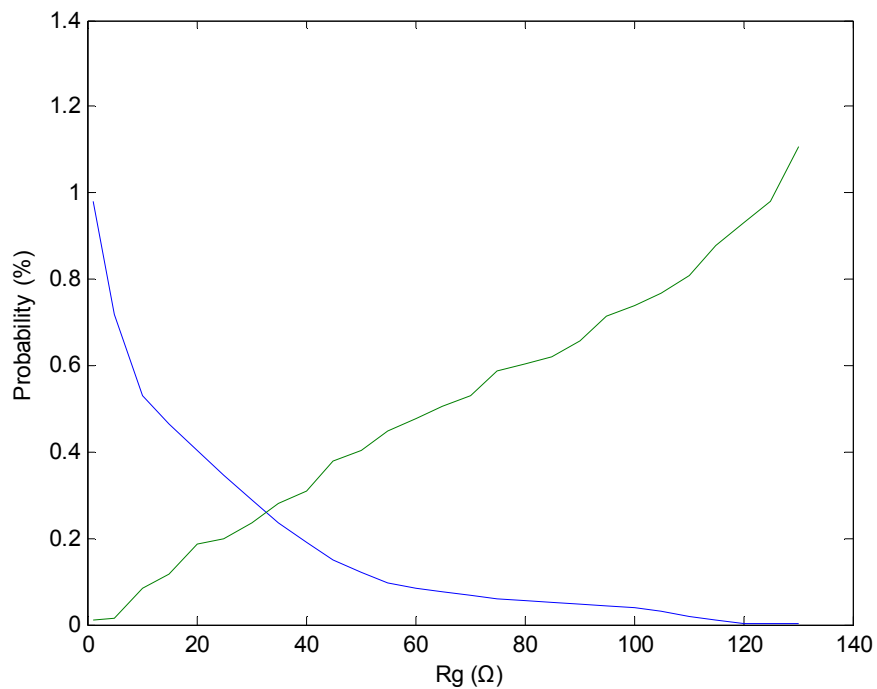
Σχήμα 5.32: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]



Σχήμα 5.33: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά ένα πυλώνα

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]



Σχήμα 5.34: Πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου 700kJ για τοποθέτηση αλεξικέραυνων ανά δύο πυλώνα

[Περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (μπλε) και γείωσης (πράσινο)]

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι για μικρές τιμές αντίστασης γείωσης, ο κυρίαρχος παράγοντας αστοχίας του αλεξικέραυνου είναι το κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης, ενώ μετά από κάποιο όριο, κυρίαρχος παράγοντας είναι το κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό γείωσης. Το όριο αυτό, όπως και παρατηρούμε, είναι συνήθως μικρές τιμές αντίστασης γείωσης.

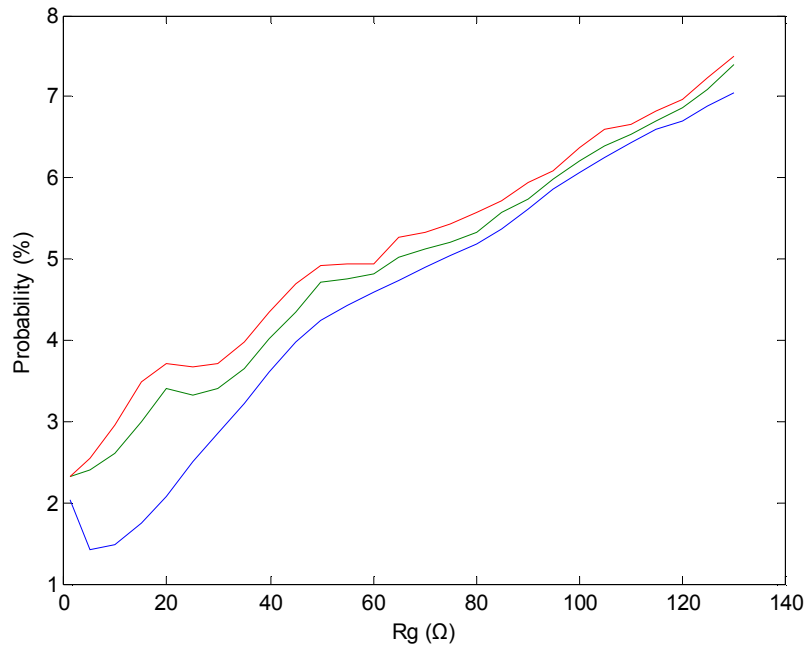
5.6.3.Ολική πιθανότητα αστοχίας αλεξικέραυνου

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, έχουμε τον ακόλουθο πίνακα με τις συνολικές πιθανότητες καταστροφής των αλεξικέραυνων, όπως προκύπτουν με άθροιση των παραπάνω επί μέρους πιθανοτήτων.

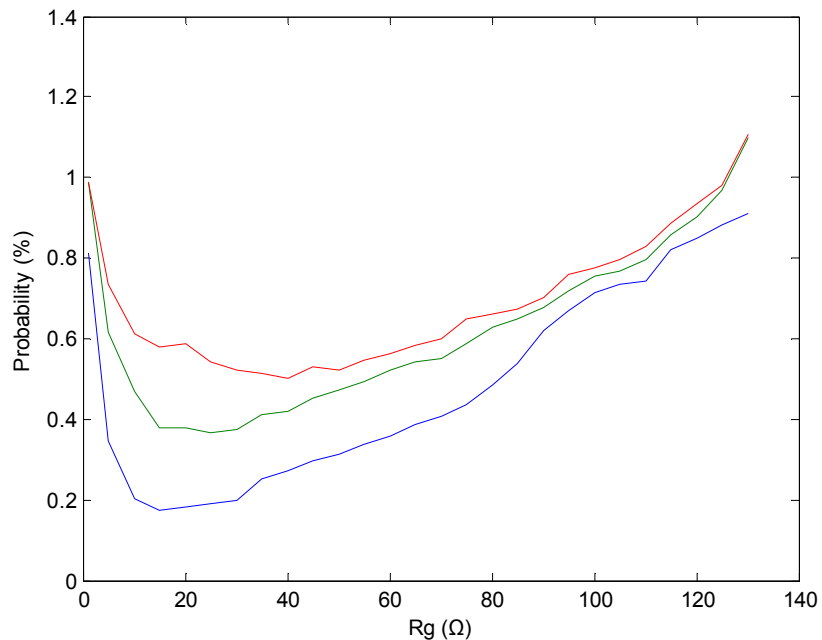
| R | 400kJ | | | 700kJ | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P0 | P1 | P2 | P0 | P1 | P2 |
| 1 | 2,026% | 2,316% | 2,317% | 0,813% | 0,988% | 0,989% |
| 5 | 1,420% | 2,403% | 2,550% | 0,344% | 0,615% | 0,734% |
| 10 | 1,480% | 2,600% | 2,960% | 0,202% | 0,467% | 0,612% |
| 15 | 1,740% | 2,990% | 3,490% | 0,172% | 0,378% | 0,580% |
| 20 | 2,070% | 3,400% | 3,710% | 0,183% | 0,378% | 0,588% |
| 25 | 2,495% | 3,330% | 3,680% | 0,189% | 0,365% | 0,544% |
| 30 | 2,855% | 3,400% | 3,705% | 0,200% | 0,374% | 0,522% |
| 35 | 3,220% | 3,660% | 3,975% | 0,252% | 0,410% | 0,515% |
| 40 | 3,610% | 4,020% | 4,340% | 0,271% | 0,421% | 0,500% |
| 45 | 3,973% | 4,340% | 4,690% | 0,297% | 0,454% | 0,529% |
| 50 | 4,240% | 4,720% | 4,920% | 0,315% | 0,472% | 0,522% |
| 55 | 4,420% | 4,760% | 4,934% | 0,336% | 0,492% | 0,548% |
| 60 | 4,588% | 4,808% | 4,948% | 0,357% | 0,521% | 0,563% |
| 65 | 4,730% | 5,027% | 5,274% | 0,388% | 0,544% | 0,582% |
| 70 | 4,892% | 5,128% | 5,325% | 0,408% | 0,550% | 0,599% |
| 75 | 5,046% | 5,208% | 5,438% | 0,437% | 0,588% | 0,649% |
| 80 | 5,180% | 5,330% | 5,580% | 0,487% | 0,629% | 0,661% |
| 85 | 5,371% | 5,565% | 5,726% | 0,537% | 0,648% | 0,672% |
| 90 | 5,617% | 5,732% | 5,950% | 0,619% | 0,678% | 0,704% |
| 95 | 5,863% | 5,980% | 6,082% | 0,668% | 0,719% | 0,760% |
| 100 | 6,060% | 6,210% | 6,380% | 0,713% | 0,754% | 0,776% |
| 105 | 6,250% | 6,400% | 6,608% | 0,734% | 0,768% | 0,797% |
| 110 | 6,429% | 6,546% | 6,669% | 0,744% | 0,798% | 0,830% |
| 115 | 6,589% | 6,710% | 6,820% | 0,820% | 0,857% | 0,888% |
| 120 | 6,700% | 6,865% | 6,960% | 0,851% | 0,902% | 0,935% |
| 125 | 6,888% | 7,090% | 7,223% | 0,881% | 0,969% | 0,982% |
| 130 | 7,048% | 7,396% | 7,507% | 0,910% | 1,101% | 1,108% |

Σχήμα 5.35: Πίνακας ολικής πιθανότητας αστοχίας αλεξικέραυνου για τοποθέτηση αλεξικέραυνων σε κάθε πυλώνα (P0), ανά ένα πυλώνα (P1) και ανά δύο πυλώνες (P2)

Οι γραφικές απεικονίσεις των πιθανοτήτων σε σχέση με τις εκάστοτε αντιστάσεις γείωσης φαίνονται παρακάτω:

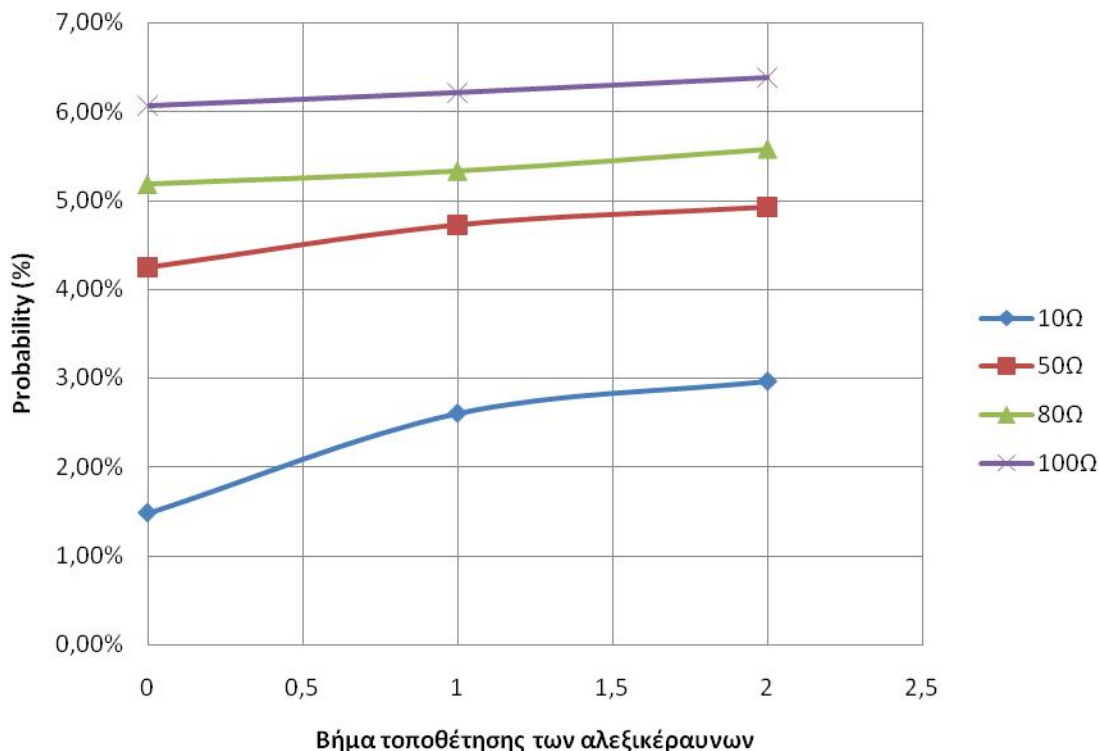


Σχήμα 5.36: Συνολική γραφική παράσταση των ολικών πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέραυνου 400kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέραυνων (μπλε: σε κάθε πλώνα, πράσινο: ανά ένα πλώνα, κόκκινο: ανά δύο πλώνες)



Σχήμα 5.37: Συνολική γραφική παράσταση των ολικών πιθανοτήτων καταστροφής του αλεξικέραυνου 700kJ για κάθε περίπτωση τοποθέτησης αλεξικέραυνων (μπλε: σε κάθε πλώνα, πράσινο: ανά ένα πλώνα, κόκκινο: ανά δύο πλώνες)

Παρακάτω παραθέτουμε μια γραφική παράσταση που δείχνει τη σχέση μεταξύ της πιθανότητας σφάλματος του αλεξικέρανου με το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέρανων για δεδομένες τιμές αντιστάσεων γείωσης.



Σχήμα 5.38: Γραφική απεικόνιση της πιθανότητας σφάλματος του αλεξικέρανου σε σχέση με το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέρανων για δεδομένη αντίσταση γείωσης

Από την παραπάνω γραφική, παρατηρούμε ότι όσο το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέρανων αυξάνει, τόσο αυξάνει και η πιθανότητα αστοχίας του αλεξικέρανου. Παρόλα αυτά, φαίνεται πως όσο μεγαλώνει η αντίσταση γείωσης, η καμπύλη τείνει να γίνει παράλληλη με τον άξονα $x-x'$, πράγμα που σημαίνει πως η πιθανότητα σφάλματος δεν επηρεάζεται τόσο από το βήμα.

5.7.Η επόμενη μέρα

Παρόλο που ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε έβγαλε ικανοποιητικά αποτελέσματα, μειονεκτούσε αρκετά σε ταχύτητα, πράγμα που καθυστέρησε πολύ τη συλλογή των αποτελεσμάτων. Περαιτέρω βελτιστοποίησή του, θα μπορούσε να εξασφαλίσει ταχύτερα αποτελέσματα, έτσι ώστε να είναι πιο αποδοτικός.

Επίσης, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί σε προσομοίωση γραμμών 400kV, όπου η γεωμετρία του πυλώνα και το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο αλλάζει, καθώς και σε γραμμές διανομής, όπου στο ελληνικό σύστημα δεν χρησιμοποιούνται αγωγοί προστασίας.

Τέλος, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να ολοκληρωθεί με την εκπόνηση μιας τεχνοοικονομικής μελέτης που θα έδειχνε πόσο συμφέρουσα θα ήταν η τοποθέτηση αλεξικέραυνων για την προστασία των γραμμών μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες καταστροφής αυτών, όπως υπολογίστηκαν από τις ανωτέρω προσομοιώσεις.

5.8.Βιβλιογραφία

- [1] Luis Cera Zanetta, Carlos Eduardo de Morais Pereira, “Application Studies of Line Arresters in Partially Shielded 138kV Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No.1, January 2003
- [2] Carlos T. Mata, Vladimir A. Rakov, Keith J. Rambo, Pepe Diaz, Raimundo Rey, and Martin A. Uman, “Measurement of the Division of Lightning Return Stroke Current Among the Multiple Arresters and Grounds of a Power Distribution Line”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003
- [3] T. A. Short, R. H. Ammon, “Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacings on Distribution Line Protection”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [4] Cvetić J., Heidler, F. and Stanić B., “Calculation of Lightning Current Parameters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 399-404, 1999
- [5] David John Browne, “Development of an Assessment Tool to Study the Effects of Transient Over Voltages in Medium Voltage Distributions”, Curtin University of Technology, November 2005
- [6] Luis Montanes, Miguel Garcia-Gracia, Mariano Sanz, and Miguel Angel Garcia, “An Improvement for the Selection of Surge Arresters Based on the Evaluation of the Failure Probability”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, January 2002
- [7] K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa, T. Kawabata, “Analytical Study on Prevention Methods for Distribution Arrester Outages Caused by Winter Lightning”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998

- [8] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, “A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines,” IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-104, pp. 919–932, April 1985
- [9] Mino Mobedjina and Lennart Stenstrom, ABB Switchgear, Ludvika, Sweden, “An Improved Transmission Line Performance Using Polymer-Housed Surge Arresters”, for presentation at CEPSI seminar, Manila, Philippines, October 2000

Κεφάλαιο 6

Επίδραση της θέσης σύνδεσης καθοδικού αλεξικέραυνου σε μετασχηματιστή

6.1.Εισαγωγή

Ο εξοπλισμός ενός υποσταθμού πρέπει να προστατεύεται έναντι ατμοσφαιρικών υπερτάσεων, οι οποίες εισέρχονται σε αυτόν, είτε με απευθείας προσβολή, είτε μέσω των γραμμών που καταφθάνουν στον υποσταθμό. Για την προστασία του υποσταθμού έναντι απευθείας προσβολών χρησιμοποιούνται, είτε ακίδες επί των κριωμάτων στερεώσεως των ζυγών, είτε πλέγμα καταλλήλως τοποθετημένων αγωγών γης. Για την προστασία έναντι υπερτάσεων που καταφθάνουν στον υποσταθμό μέσω των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούνται διάκενα στις εισόδους των γραμμών μεταφοράς και αλεξικέραυνα [1].

Ένα αλεξικέραυνο προσφέρει σε μια συσκευή την προστασία που χαρακτηρίζεται από τη στάθμη προστασίας του, μόνο αν συνδεθεί ακριβώς στον ακροδέκτη της συσκευής και ο αγωγός γειώσεώς του είναι πολύ μικρού μήκους. Αν, αντίθετα, μεταξύ του αλεξικέραυνου και της υπό προστασίας συσκευής μεσολαβεί μια απόσταση, τότε, εξαιτίας ανακλάσεων, προσβάλλουν τη συσκευή τάσεις υψηλότερες από αυτές που αντιστοιχούν στη στάθμη προστασίας και μάλιστα τόσο υψηλότερες, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη συσκευή και όσο πιο απότομο είναι το μέτωπο της υπερτάσεως [2].

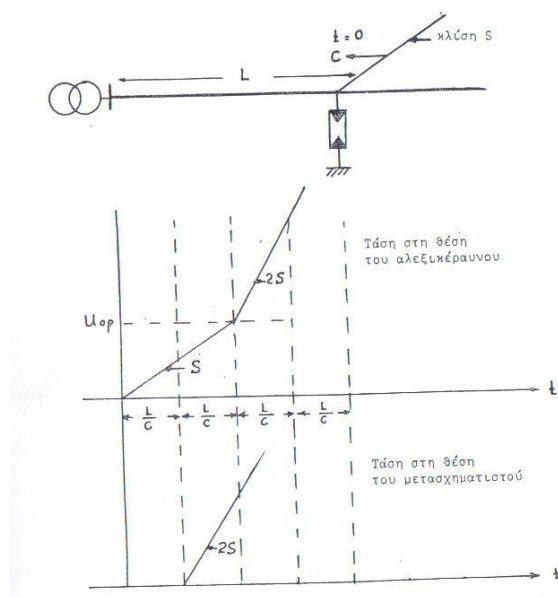
Με βάση τα παραπάνω, λοιπόν, συμπεραίνουμε πως η κακή εκλογή της θέσεως ενός αλεξικέραυνου μπορεί να έχει σαν συνέπεια την ανυπαρξία προστασίας ή την ελάττωση της προστασίας αυτού προς τον εξοπλισμό. Πλήρης προστασία παρέχεται, όταν το αλεξικέραυνο είναι τοποθετημένο στη ίδια ή σχεδόν την ίδια θέση με το μετασχηματιστή.

Καθώς μεγαλώνουμε την απόσταση L μετασχηματιστή – αλεξικέραυνου, η προστασία που παρέχεται από το αλεξικέραυνο μειώνεται.

6.2.Επίδραση της θέσης και τρόπου σύνδεσης του αλεξικέραυνου στη στάθμη προστασίας

Θα θεωρήσουμε σαν τυπικό παράδειγμα την προστασία ενός μετασχηματιστή ενός ακραίου υποσταθμού. Πλήρης προστασία (με στάθμη προστασίας U_{π}) παρέχεται όταν το αλεξικέραυνο είναι τοποθετημένο στην ίδια ή σχεδόν την ίδια σχέση με τον μετασχηματιστή. Καθώς μεγαλώνουμε την απόσταση L μετασχηματιστή-αλεξικέραυνου η προστασία που παρέχεται από το αλεξικέραυνο μειώνεται ή ακριβέστερα αυξάνεται αυξάνει η στάθμη προστασίας U'_{π} . Θα υπολογίσουμε στη συνέχεια την στάθμη προστασίας U'_{π} που παρέχει το αλεξικέραυνο στον μετασχηματιστή όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι L σε m και τα κύματα, κλίσεως s σε kV/μs, διαδίδονται με ταχύτητα διαδόσεως c σε m/μs [2,3].

Υποθέτουμε ότι το μέτωπο του κύματος καταφθάνει στην θέση του αλεξικέραυνου την χρονική στιγμή $t=0$. Μετά από χρόνο $t=L/c$ το κύμα καταφθάνει στον μετασχηματιστή και λόγω της μεγάλης κυματικής αντίστασης που παρουσιάζει αυτός για ταχέως μεταβαλλόμενα κύματα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η γραμμή είναι ανοιχτή και ότι συνεπώς η τάση διπλασιάζεται (διπλασιάζεται η κλίση και γίνεται $2s$, όπως δείχνεται και στο Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Προστασία μετασχηματιστή από αλεξικέραυνα

Το κύμα ανακλώμενο επιστρέφει στη θέση του αλεξικέρανου την χρονική στιγμή $t=2L/c$ οπότε η κλίση του κύματος στη θέση του αλεξικέρανου διπλασιάζεται. Την χρονική στιγμή $t=2L/c$ η τάση που έχει αναπτυχθεί στη θέση του αλεξικέρανου θα είναι $U_{op} = \frac{2L}{c}s$. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Η τάση διάσπασης του αλεξικέρανου, που εδώ θα την θεωρήσουμε ίση με την στάθμη προστασίας U_{π} που παρέχει αυτό, είναι μεγαλύτερη από την U_{op} δηλαδή

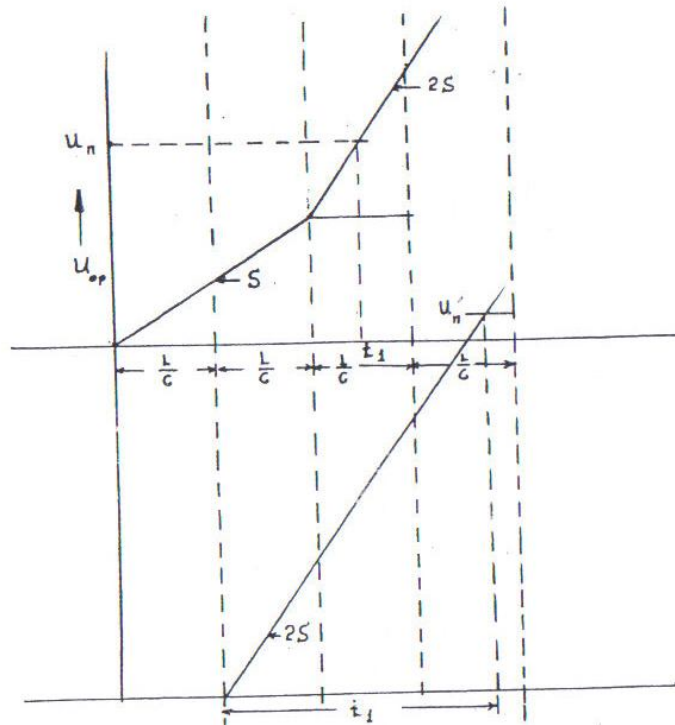
$$U_{\pi} > U_{op} = \frac{2L}{c}s.$$

- Αντίθετα η τάση διάσπασης U_{π} είναι μικρότερη από την U_{op} δηλαδή

$$U_{\pi} < U_{op} = \frac{2L}{c}s.$$

Στην πρώτη ($U_{\pi} > U_{op}$) το αλεξικέρανο θα διασπασθεί την χρονική στιγμή t_1 , όπως πολύ εύκολα προκύπτει από το Σχήμα 6.2

$$t_1 = \frac{2L}{c} + \frac{U_{\pi} - U_{op}}{2s} \quad \text{δηλ} \quad t_1 = \frac{L}{c} + \frac{U_{\pi}}{2s} \quad (6.1)$$



Σχήμα 6.2: Εκτίμηση ενός στάθμης προστασίας ενός αλεξικέρανου

Επομένως η τάση στον μετασχηματιστή θα αναπτυχθεί μέχρι την τιμή

$$U_{\pi}' = 2s \cdot t_1 = \frac{2Ls}{c} + U_{\pi} \quad (6.2)$$

Στη δεύτερη περίπτωση ($U_{\pi} < U_{op}$) τα πράγματα είναι απλούστερα διότι προφανώς $t_1 = U_{\pi}/s$ και συνεπώς

$$U'_{\pi} = 2s \cdot t_1 = 2U_{\pi} \quad (6.3)$$

Ανακεφαλαιώνοντας έχουμε ότι

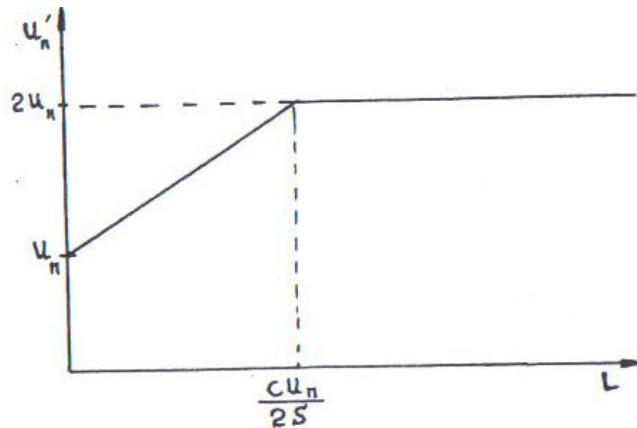
$$U'_{\pi} = U_{\pi} + \frac{2Ls}{c} \quad \text{για } L < \frac{c \cdot U_{\pi}}{2s} \quad (6.5)$$

$$U'_{\pi} = 2U_{\pi} \quad \text{για } L > \frac{c \cdot U_{\pi}}{2s} \quad (6.6)$$

Η συνάρτηση $U'_{\pi} = U'_{\pi}(L)$ δείχνεται στο Σχήμα 6.3.

Για να αποκτήσουμε μια αντίληψη των σχετικών μεγεθών, θα θεωρήσουμε το παράδειγμα του αλεξικέρανου της προηγούμενης παραγράφου, για το οποίο θεωρήσαμε ότι είναι $U_{\pi} = 865 \text{ kV}$ και $U'_{\pi} \leq 908 \text{ kV}$ με $c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ και $s = 1200 \text{ kV}/\mu\text{s}$ έχουμε

$$L \leq \frac{(908 - 865)}{2s} = \frac{43 \cdot 300}{2000} = 6.5 \text{ m} \quad (6.7)$$



Σχήμα 6.3: Παρεχόμενη στάθμη προστασίας αλεξικέρανου συναρτήσει της απόστασης από τον μετασχηματιστή

Το συμπέρασμα συνεπώς είναι ότι για να εξασφαλίζεται η προστασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο με περιθώριο προστασίας έναντι ατμοσφαιρικών υπερτάσεων 57% θα πρέπει το αλεξικέρανο να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από 6.5m από τον προστατευόμενο εξοπλισμό. Αντίθετα μπορούμε τώρα να προσδιορίσουμε για δεδομένη απόσταση L το περιθώριο προστασίας από τη σχέση

$$\frac{BIL - U'_{\pi}}{U'_{\pi}} = \frac{BIL}{U'_{\pi}} - 1 = \frac{BIL}{U_{\pi} + \frac{2Ls}{c}} - 1 \quad (6.8)$$

Για περιθώριο προστασίας ίσο προς το ελάχιστο περιθώριο που προβλέπουν οι κανονισμοί, δηλαδή 25%, προκύπτει

$$\frac{BIL}{U_{\pi} + \frac{2Ls}{c}} = 1.25 \quad (6.9)$$

Άρα
$$L_{\max} = \frac{c}{2s} \left(\frac{BIL}{1.25} - U_{\pi} \right) \quad (6.10)$$

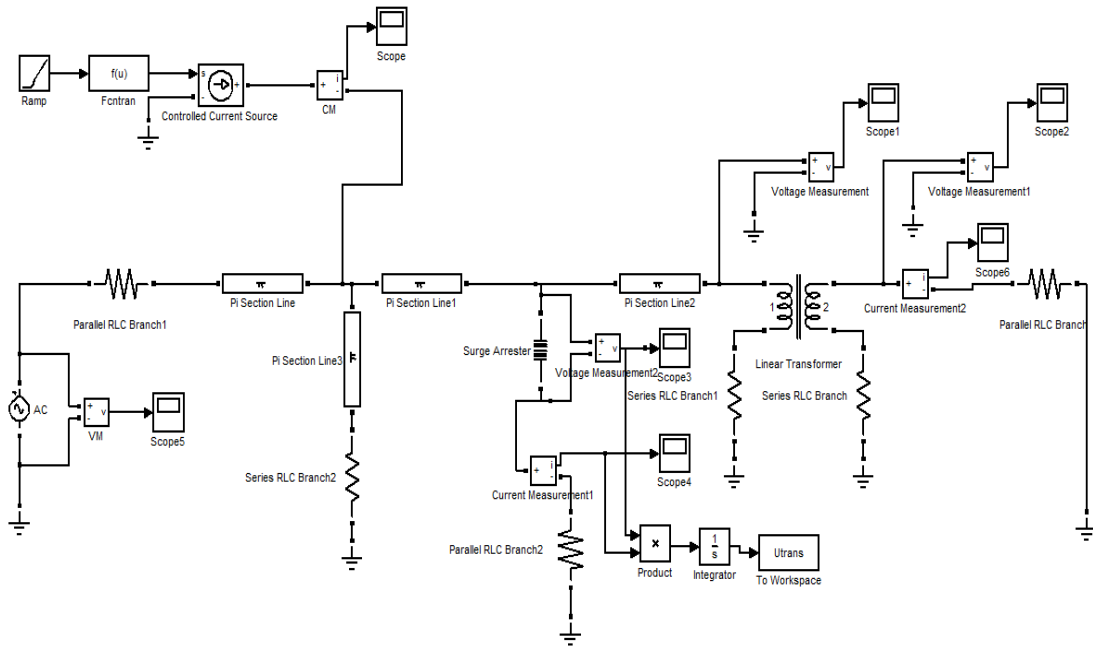
Με τα αριθμητικά δεδομένα του παραδείγματος προκύπτει:

$$L_{\max} = \frac{300}{2 \cdot 1000} \left(\frac{1425}{1.25} - 865 \right) = 41.2m$$

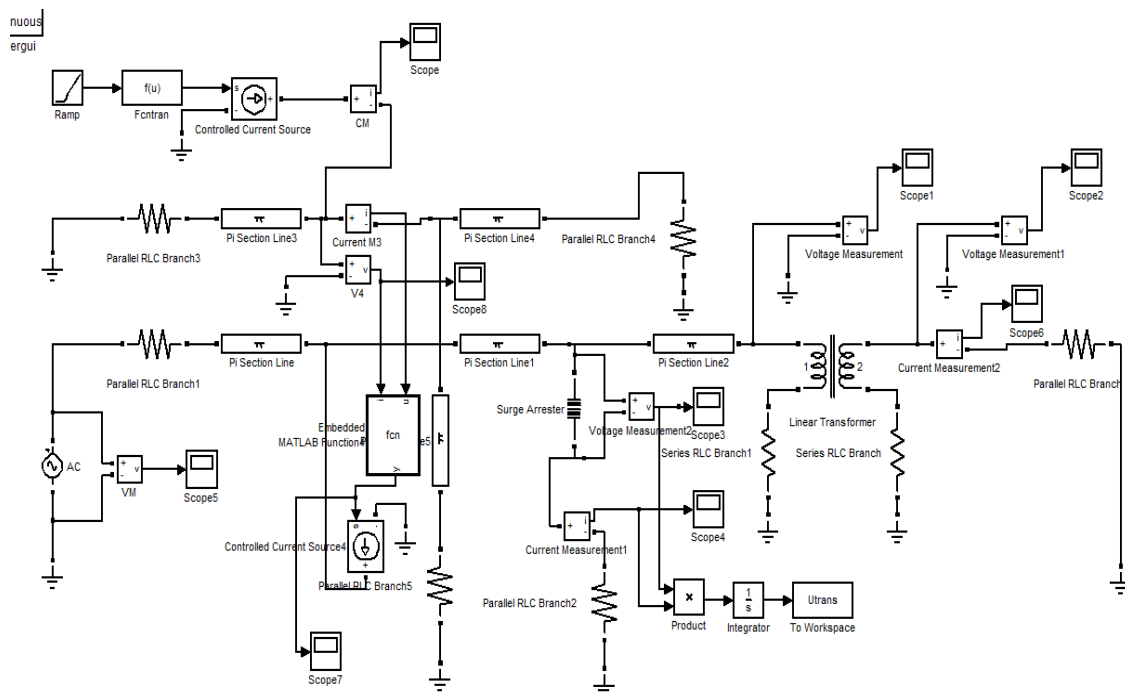
Για να εξασφαλίζεται, συνεπώς, ικανοποιητική προστασία με το ελάχιστο περιθώριο προστασίας του 25% που προβλέπουν οι κανονισμοί δεν πρέπει το αλεξικέραυνο να απέχει απόσταση μεγαλύτερη από 41.2m από τον μετασχηματιστή. Σημειωτέον ότι για ακόμη μεγαλύτερες κλίσεις μετώπου κύματος (π.χ. $s=1200\text{kV}/\mu\text{s}$) η ανωτέρω μέγιστη απόσταση L_{\max} μειώνεται στην τιμή των 34m. Για τους ανωτέρω λόγους έχει θεσπισθεί στα 400kV τα αλεξικέραυνα να μην απέχουν από τον εξοπλισμό τον οποίο προστατεύουν περισσότερο από 30m.

6.3.Προσομοίωση υποσταθμού

Στο παράδειγμα, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε, θα θεωρήσουμε την προστασία ενός μετασχηματιστή ενός ακραίου υποσταθμού. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 6.1: Διάταξη της προσομοίωσης για άμεσο κεραυνικό πλήγμα στη γραμμή φάσης



Σχήμα 6.2: Διάταξη της προσομοίωσης για έμμεσο κεραυνικό πλήγμα στη γραμμή προστασίας

Το κύκλωμα αποτελείται από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης σε σειρά με μια γραμμή μεταφοράς αρκετά μεγάλη, η οποία αναπαριστά τις υπόλοιπες γραμμές μεταφοράς του δικτύου. Κατόπιν, έχουμε δυο γραμμές που προσομοιώνονται με δύο Pi Section Lines και οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εξής: η πρώτη Pi Section Line ορίζει την απόσταση του

κεραυνού από το αλεξικέραυνο(μήκος 240m), ενώ η δεύτερη Pi Section Line ορίζει την απόσταση του αλεξικέραυνου από τον μετασχηματιστή(μήκος 30m). Γι' αυτό και το αλεξικέραυνο ενέργειας αντοχής 750kJ τοποθετείται ανάμεσα σε αυτές τις γραμμές και σε σειρά με μια αντίσταση γείωσης μεταβλητής τιμής. Ο πυλώνας προσομοιώνεται, επίσης, με ένα Pi Section Line και μια αντίσταση γείωσης. Ο μετασχηματιστής παριστάνεται με ένα Line Transformer και συνδέεται στην πορεία με ένα φορτίο 100Ω. Η εξίσωση του κεραυνικού ρεύματος που πλήττει τη γραμμή είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες προσομοιώσεις. Σε όλο το κύκλωμα έχουν τοποθετηθεί μετρητές ρεύματος και τάσης για έλεγχο των αποτελεσμάτων [4].

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του προηγούμενου κεφαλαίου, βρήκαμε τις πιθανότητες σφάλματος του αλεξικέραυνου για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης και γείωσης, καθώς και την ολική πιθανότητα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| R (Ω) | Πιθανότητα σφάλματος αλεξικέραυνου για άμεσο κεραυνικό πλήγμα | Πιθανότητα σφάλματος αλεξικέραυνου για έμμεσο κεραυνικό πλήγμα | Ολική πιθανότητα σφάλματος του αλεξικέραυνου |
|-------|---|--|--|
| 10 | 4.31% | 1.77% | 6.08% |
| 20 | 4.30% | 0.89% | 5.19% |
| 30 | 4.29% | 0.61% | 4.90% |
| 40 | 4.29% | 0.44% | 4.73% |

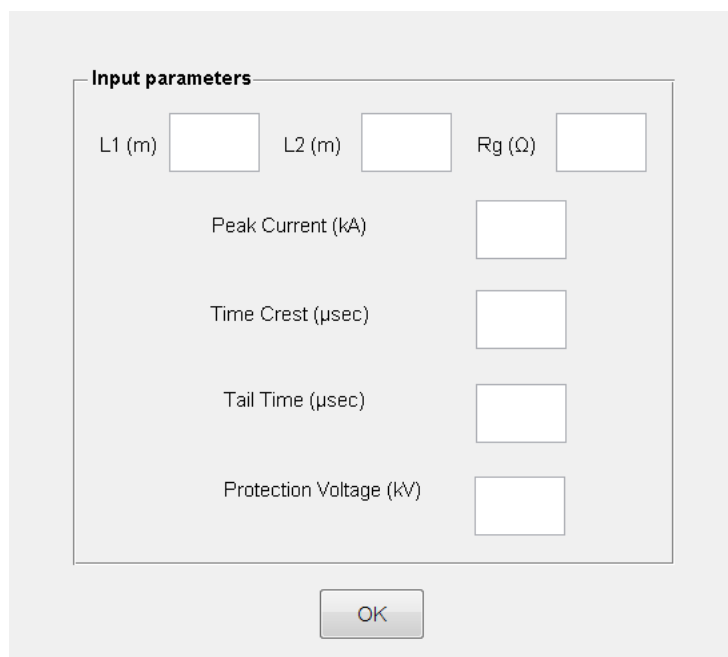
Πίνακας 6.1: Πίνακας πιθανοτήτων αστοχίας αλεξικέραυνου

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι οι μετρήσεις έγιναν για σχετικά μικρές τιμές αντίστασης γείωσης, καθώς στους υποσταθμούς πάντα φροντίζουμε να έχουμε μικρή αντίσταση γείωσης, σε αντίθεση με τις γραμμές μεταφοράς που λόγω του αριθμού των πυλώνων είναι οικονομικά ασύμφορο να βελτιώσουμε τις αντιστάσεις γείωσης όλων των πυλώνων.

6.4.Δημιουργία διεπαφή (interface) για εισαγωγή παραμέτρων και εμφάνιση αποτελεσμάτων

6.4.1.Εισαγωγή των παραμέτρων της προσομοίωσης

Με τη χρήση του GUI, κατασκευάσαμε την ακόλουθη διεπαφή (interface), όπου η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται μέσω του ακόλουθου παραθύρου:



The image shows a dialog box titled "Input parameters" with a light gray background. Inside the dialog box, there are seven input fields arranged in two rows. The first row contains three fields: "L1 (m)", "L2 (m)", and "Rg (Ω)". The second row contains four fields: "Peak Current (kA)", "Time Crest (μsec)", "Tail Time (μsec)", and "Protection Voltage (kV)". Below the input fields, there is an "OK" button centered at the bottom of the dialog box.

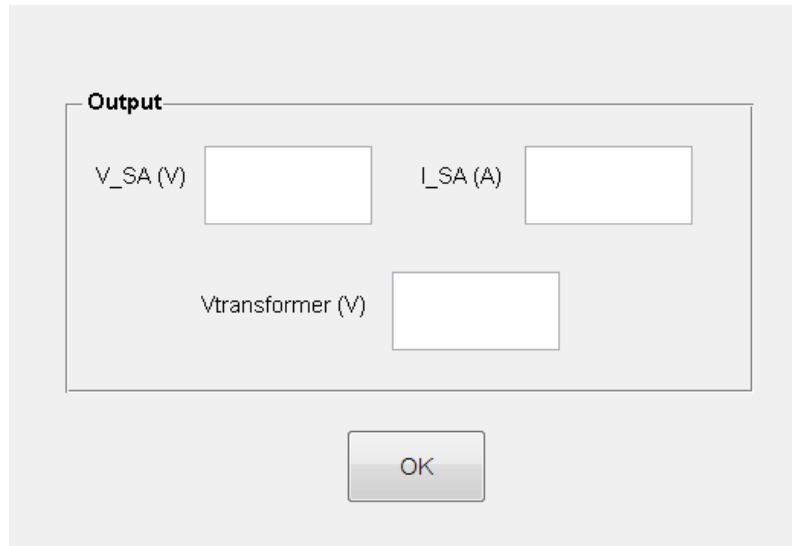
Σχήμα 6.3: Εισαγωγή δεδομένων στην προσομοίωση

Με βάση τα στοιχεία που εισάγουμε, μπορούμε να μεταβάλλουμε τις ακόλουθες τιμές:

- α) Το μήκος της γραμμής Pi Section Line 1, που αναφέρεται στην απόσταση του κεραυνικού πλήγματος από το αλεξικέραυνο,
- β) Το μήκος της γραμμής Pi Section Line 2, που αναφέρεται στην απόσταση του αλεξικέραυνου από τον υποσταθμό,
- γ) Την τιμή της αντίστασης γείωσης R_g ,
- δ) Την κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος, καθορίζοντας την τιμή του μέγιστου ρεύματος, του χρόνου μετώπου και του χρόνου ημίσεως εύρους και
- ε) Την τάση προστασίας του αλεξικέραυνου.

6.4.2.Εμφάνιση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων μετά το πέρας της προσομοίωσης, δημιουργήσαμε το ακόλουθο παράθυρο:



Σχήμα 6.4: Εμφάνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα, τα οποία λαμβάνουμε είναι τα εξής:

- α) Η τάση στα άκρα του αλεξικέραννου,
- β) Το ρεύμα που διαρρέει το αλεξικέραννο,
- γ) Η τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή και

6.5.Βιβλιογραφία

- [1] Χρήστος Μαινεμενλής, “Μόνωση Ηλεκτρικών Δικτύων Υψηλής Τάσης”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2008
- [2] Ευαγ. Λεκατσάς, “Θέματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Αθήνα 1985
- [3] Ι.Α. Σταθόπουλος, “Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
- [4] V. Hinrichsen, “Metal-Oxide Surge Arresters”, Siemens, 1st Edition, 2001

Κεφάλαιο 7

Νευρωνικά δίκτυα

7.1.Βασικές έννοιες

Τα νευρωνικά δίκτυα εκτελούν υπό συμβολική επεξεργασία πληροφορίας, η οποία βασίζεται στην λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και επικαλούνται την ιδέα της μοντελοποίησης μαύρου κουτιού (black box), χρησιμοποιώντας μοντέλα του ανθρώπινου εγκεφάλου, τα οποία εμπνέονται από τη βιολογία και τη νευροφυσιολογία. Για την χρήση των μοντέλων του είδους αυτού, διατίθενται μέθοδοι που υλοποιούν πολύπλοκες συναρτήσεις και λειτουργίες. Για την εφαρμογή των μεθόδων αυτών δεν απαιτείται ρητή γνώση, σε αντίθεση με ότι ισχύει κατά τη εφαρμογή συμβολικών μεθόδων της τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες στηρίζονται στη λογική. Στα συμβολικά συστήματα της τεχνητής νοημοσύνης, η γνώση παριστάνεται ρητά, π.χ. με κανόνες παραγωγής. Στην υποσυμβολική προσέγγιση δεν δίνεται η υπό εξέταση σχέση ρητά, αλλά κωδικοποιείται στη δομή ενός νευρωνικού δικτύου [1].

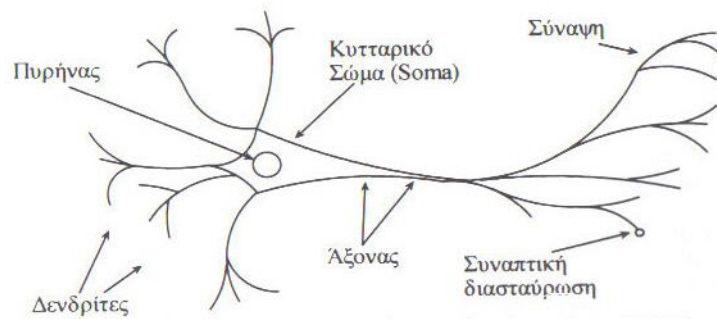
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι συστήματα μεγάλης κλίμακας, τα οποία περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών επεξεργαστών ειδικού τύπου, οι οποίοι καλούνται νευρόνια. Κάθε νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από μια κατάσταση, ένα σύνολο εισόδων με βάρη που προέρχονται από άλλα νευρόνια και μία εξίσωση, η οποία περιγράφει τη δυναμική λειτουργία του νευρωνικού δικτύου. Τα βάρη του νευρωνικού δικτύου ανανεώνονται, δηλαδή παίρνουν νέες τιμές, μέσω μιας διαδικασίας μάθησης η οποία πραγματοποιείται με την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης κόστους, ανανεώνοντας βήμα προς βήμα τα βάρη. Οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εργασίας για την οποία προορίζεται το νευρωνικό δίκτυο. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι κατάλληλα για προβλήματα, για τα οποία ο συνήθης υπολογισμός δεν είναι αποδοτικός, π.χ. μηχανική όραση, αναγνώριση προτύπων,

αναγνώριση φωνής, μη γραμμική πρόβλεψη, ελεύθερη μοντέλου αναγνώριση συστημάτων, αυτόματο έλεγχο, ρομποτική, επιχειρησιακά προβλήματα, κλπ.

7.1.1. Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρονίου

Με τον όρο ‘τεχνητό νευρωνικό δίκτυο’ εννοούμε κάθε αρχιτεκτονική υπολογισμού, η οποία περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων απλών νευρωνικών επεξεργαστών. Το βασικό μοντέλο του τεχνητού νευρονίου στηρίζεται στο μοντέλο του βιολογικού νευρονίου, το οποίο έγινε από τους Mc Culloch και Pitts. Πριν την παρουσίαση του μοντέλου, λοιπόν, θα ήταν χρήσιμη μία αναφορά στην λειτουργία και την δομή των βιολογικών νευρωνικών δικτύων.

Το νευρόνιο (ή νεύρωνας) είναι το θεμελιακό δομικό στοιχείο του ανθρώπινου νευρικού συστήματος. Τα νευρόνια είναι ζώντα κύτταρα. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει κατά προσέγγιση 1.5×10^{10} νευρόνια διαφόρων μορφών. Κάθε νευρόνιο λαμβάνει σήματα μέσω περίπου 10^4 συνάψεων. Όλα τα νευρόνια, ανεξάρτητα από το είδος, το σχήμα και το μέγεθός τους, αποτελούνται από τα ίδια βασικά μέρη: το κυτταρικό σώμα, τους δενδρίτες και τον άξονα, όπως δείχνει και το Σχήμα 7.1.



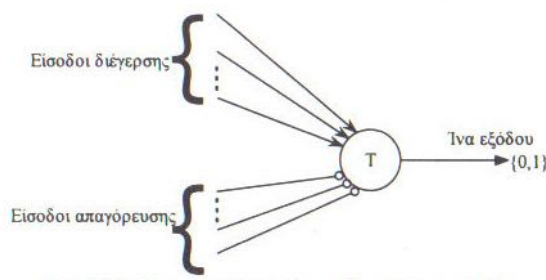
Σχήμα 7.1: Δομή τυπικού βιολογικού νευρονίου (νευρόνιο κίνησης)

Το κυτταρικό σώμα είναι το κεντρικό μέρος του νευρονίου και το σχήμα του μπορεί να είναι στρογγυλό, τριγωνικό, σταγονοειδές, μυτερό στα δύο άκρα κλπ, ανάλογα με το είδος του νευρονίου. Το μέγεθος του σώματος είναι περίπου 10-80μm. Το σώμα περιέχει τον πυρήνα και το αντίστοιχο συνδετικό πρωτόπλασμα. Η σύνδεση του νευρονίου με τα πολυάριθμα γειτονικά νευρόνια γίνεται μέσω του άξονα και των συνάψεων. Οι δενδρίτες συνθέτουν την εξωτερική επιφάνεια του νευρονίου και μεταφέρουν πληροφορίες στο σώμα του κυττάρου. Ο άξονας, που αποτελεί το τμήμα εξόδου του νευρικού κυττάρου, είναι μία

λεπτή κυλινδρική ίνα, η οποία μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες ηλεκτροχημικά με βάση την κατάσταση του κυττάρου. Οι δενδρίτες και οι άξονες έχουν διάμετρο ολίγων μm .

Ένα νευρόνιο παράγει έξοδο, μόνο όταν εμφανισθούν αρκετοί παλμοί στην περιοχή των δενδριτών για ένα μικρό χρονικό διάστημα που ονομάζεται λανθάνουσα περίοδος άθροισης. Στην πραγματικότητα, κάποιες εισοδοί εμποδίζουν την ενεργοποίηση του κυττάρου, έτσι ώστε να μπορούμε να πούμε ότι ένα νευρόνιο ενεργοποιείται εάν οι ενεργές εισοδοί διέγερσης ξεπερνούν τις ενεργές απαγορευτικές εισόδους κατά μία ποσότητα ίση με την «τιμή κατωφλίου» του κυττάρου. Ένα τμήμα του σώματος, ονομαζόμενο «εκκινητής κορυφής», πραγματοποιεί την πρόσθεση αυτή και την σύγκριση με το κατώφλι παράγοντας ένα παλμικό σήμα εξόδου για τις υπάρχουσες καταστάσεις εισόδου. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής παλμών μέσα σε ένα νευρικό κύτταρο είναι περίπου 5000 παλμοί/sec, ενώ το τυπικό πλάτος ενός νευρικού παλμού είναι περίπου 100 μV , με αποτέλεσμα ο παλμός να πλησιάζει τα +30mV. Ο χρόνος καθυστέρησης ανάμεσα στη διέγερση του νευρονίου και την παραγωγή του παλμού κυμαίνεται από 0.1msec μέχρι 1msec. Η τιμή του κατωφλίου ενός νευρονίου είναι συνάρτηση του χρόνου.

Ύστερα από την σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του βιολογικού νευρονίου, παρουσιάζεται το μοντέλο των Mc Culloch-Pitts, το οποίο δεν είναι ένα πλήρες μοντέλο του νευρικού κυττάρου, αλλά μία απλή παρουσίαση δύο καταστάσεων της λογικής διαδικασίας που λαμβάνει χώρα σε αυτό. Η μορφή του μοντέλου αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2: Μοντέλο νευρονίου Mc Culloch-Pitts

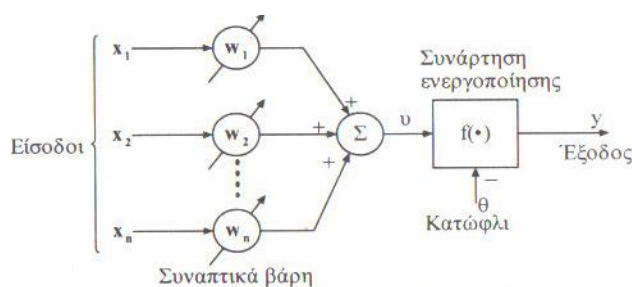
Η ίνα εξόδου του κυττάρου συσχετίζει τις πληροφορίες που αφορούν στην κατάσταση του νευρονίου (διέγερση ή όχι) και τελικά γίνεται είσοδος σε ένα άλλο κύτταρο (ή και στο ίδιο). Επιτρέπεται οποιοσδήποτε αριθμός εισόδων και οι εισοδοί αυτοί διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: στις εισόδους που διεγείρουν το κύτταρο και στις απαγορευτικές εισόδους. Οι εισοδοί διέγερσης που αναπαρίστανται με μία γραμμή, η οποία καταλήγει σε ένα βελάκι, τείνουν στο να διεγείρουν το κύτταρο κατά αυξανόμενο τρόπο

μέχρι την τελική διέγερση. Οι απαγορευτικές εισοδοι αναπαρίστανται από μία γραμμή η οποία καταλήγει σε μικρό κύκλο. Οι εισοδοι αυτοί είναι ικανές να απαγορεύουν εντελώς την διέγερση του κυττάρου.

Έστω T η αριθμητική τιμή του κατωφλίου διέγερσης του κυττάρου. Το κύτταρο Mc Culloch-Pitts θα διεγερθεί, όταν το άθροισμα των εισόδων διέγερσης γίνει μεγαλύτερο ή ίσο με την τιμή του κατωφλίου και δεν υπάρχουν απαγορευτικές εισοδοι.

| Κατάσταση Εισόδου | Έξοδος |
|-------------------|----------------------|
| $E \geq T, I=0$ | Υπάρχει διέγερση |
| $E \geq T, I>0$ | Δεν υπάρχει διέγερση |
| $E < T, I=0$ | Δεν υπάρχει διέγερση |
| $E < T, I \leq 0$ | Δεν υπάρχει διέγερση |

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το βασικό μοντέλο του τεχνητού νευρονίου στηρίζεται στο μοντέλο Mc Culloch-Pitts και έχει την μορφή του Σχήματος 7.3.



Σχήμα 7.3: Βασικό μοντέλο τεχνητού νευρονίου

Παρατηρούμε ότι το νευρόνιο είναι μια θεμελιακή μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας, η οποία αποτελείται από τρία στοιχεία:

- ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεων),
- έναν κόμβο άθροισης (γραμμικής άθροισης) και
- μια συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα)

Κάθε κλάδος διασύνδεσης έχει ένα βάρος (weight, strength), το οποίο είναι θετικό εάν η σύναψη είναι διεγερτικού τύπου (excitatory) και αρνητικό εάν η σύναψη είναι απαγορευτικού ή αναχαιτιστικού τύπου (inhibitory). Ο κόμβος άθροισης αθροίζει τα σήματα εισόδου πολλαπλασιαζόμενα με τα αντίστοιχα βάρη των συνάψεων. Συνεπώς, ο κόμβος άθροισης είναι μια μονάδα γραμμικού συνδυασμού. Τέλος, η συνάρτηση ενεργοποίησης (η οποία ονομάζεται, επίσης, συνάρτηση σύνθλιψης/squashing function)

περιορίζει (συνθλίβει) το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή (συνήθως στο κανονικοποιημένο διάστημα $[0,1]$ ή, εναλλακτικά, στο διάστημα $[-1,1]$). Το μοντέλο του νευρονίου περιέχει, επίσης, ένα κατώφλι που εφαρμόζεται εξωτερικά και πρακτικά υποβιβάζει την καθαρή είσοδο στην συνάρτηση ενεργοποίησης. Βεβαίως, η καθαρή είσοδος της συνάρτησης ενεργοποίησης μπορεί να αυξηθεί, αν χρησιμοποιήσουμε έναν όρο πόλωσης b , ο οποίος είναι το αρνητικό του κατωφλίου ($b = -\theta$).

Από το Σχήμα 7.3 προκύπτει ότι το νευρόνιο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (7.1)$$

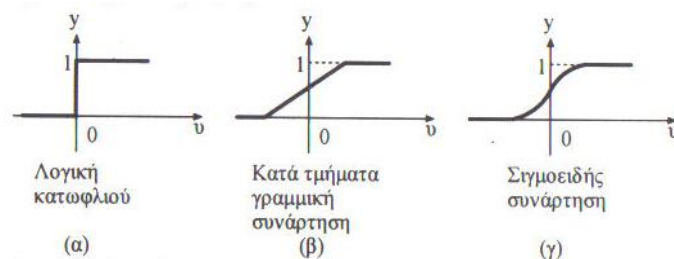
$$y = f(u - \theta), \theta > 0$$

όπου x_i ($i=1,2,\dots,n$) είναι τα σήματα εισόδου, w_i ($i=1,2,\dots,n$) είναι τα συναπτικά βάρη του νευρονίου, u είναι η είσοδος του γραμμικού συνδυαστή, θ είναι το κατώφλι, f είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και y είναι το σήμα εξόδου του νευρονίου.

Το νευρόνιο που παρίσταται από το μοντέλο του Σχήματος 7.3 είναι στατικό, γιατί η έξοδος του αθροιστή (u) περνάει αμέσως στη μονάδα (συνάρτηση) ενεργοποίησης f . Εάν το σήμα u περάσει προηγουμένως από ένα δυναμικό σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $H(s)$, όπου s είναι η μιγαδική μεταβλητή του μετασχηματισμού Laplace, τότε έχουμε ένα δυναμικό νευρόνιο. Δυναμικό νευρόνιο έχουμε και όταν υπάρχει ανατροφοδότηση από την έξοδο του νευρονίου σε κάποιες ή τις τις εισόδους του.

Ας μελετήσουμε τώρα τη συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω τρεις μορφές (Σχήμα 7.4):

- συνάρτηση λογικής κατωφλίου,
- κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση και
- συνεχής σιγμοειδής συνάρτηση



Σχήμα 7.4: Συνήθεις μορφές συνάρτησης ενεργοποίησης νευρονίων

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης του Σχήματος 7.4 ορίζονται ως ακολούθως:

- **Συνάρτηση κατωφλίου**

$$f(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases} \quad (7.2)$$

Το αντίστοιχο νευρόνιο έχει τις εξισώσεις

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \quad (7.3)$$

$$y = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases} \quad (7.4)$$

και είναι το γνωστό μοντέλο των Mc Culloch-Pitts που αναφέραμε στα προηγούμενα.

- **Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση**

$$f(x) = \begin{cases} 0, & u \leq -1/2 \\ u, & -1/2 < u < 1/2 \\ 1, & u \geq 1/2 \end{cases} \quad (7.5)$$

Η συνάρτηση αυτή παριστά ένα γραμμικό ενισχυτή με κορεσμό και μεταπίπτει στη συνάρτηση κατωφλίου, εάν η απολαβή (ενίσχυση) του ενισχυτή γίνει πάρα πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη).

- **Σιγμοειδής συνάρτηση**

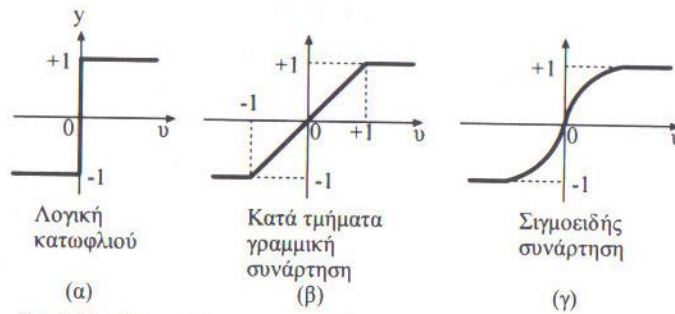
Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι η πιο ευρύτατα χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης και μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς, είναι με την λογιστική συνάρτηση:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda u}} \quad (7.6)$$

όπου λ είναι η παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης. Για διάφορα λ παίρνουμε σιγμοειδής συναρτήσεις με διαφορετική κλίση. Η κλίση στην αρχή ($u=0$) είναι ίση με $\lambda/4$.

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης του Σχήματος 7.4 παίρνουν τιμές μεταξύ 0 και 1, δηλαδή $0 \leq f(u) < 1$.

Εκτός από αυτές, σε πολλές εφαρμογές χρειαζόμαστε τιμές στο διάστημα $[-1,+1]$, οπότε έχουμε τις συναρτήσεις του Σχήματος 7.5.



Σχήμα 7.5: Συναρτήσεις ενεργοποίησης με τιμές στο διάστημα $[-1, +1]$

Οι συναρτήσεις του Σχήματος 7.5 περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις :

- **Συνάρτηση κατωφλίου (συνάρτηση προσήμου)**

$$f(u) = \begin{cases} -1, u < 0 \\ 0, u = 0 \\ +1, u > 0 \end{cases} \quad (7.7)$$

- **Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση**

$$f(u) = \begin{cases} -1, u \leq -1 \\ u, -1 < u < +1 \\ +1, u \geq +1 \end{cases} \quad (7.8)$$

- **Σιγμοειδής συνάρτηση (υπερβολική εφαπτόμενη)**

$$f(u) = \tanh\left(\frac{u}{2}\right) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}} \quad (7.9)$$

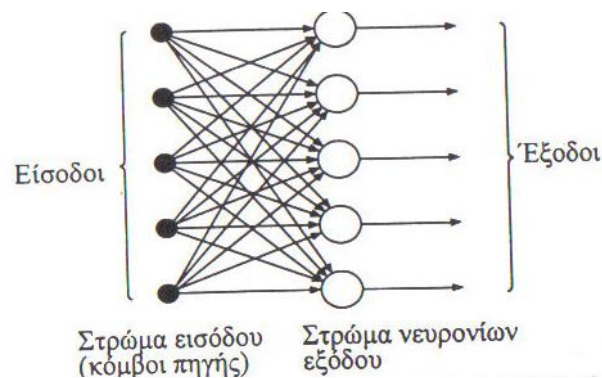
7.2.Αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων

7.2.1.Γενικά

Η τοπολογική δομή είναι το κύριο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων και αναφέρεται στην αρχιτεκτονική στην οποία διευθετούνται και διασυνδέονται πολλαπλά νευρόνια. Οι δύο βασικές ιδιότητες που καθορίζουν την αρχιτεκτονική της νευρωνικού δικτύου είναι το πλήθος των στρωμάτων (layers) και οι συνδέσεις ανάμεσα στα νευρόνια. Το τρίτο χαρακτηριστικό, το οποίο σχετίζεται φυσιολογικά με τον τρόπο κατά τον οποίο είναι δομημένα τα νευρόνια, είναι ο αλγόριθμος μάθησης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου.

7.2.2.Νευρωνικά δίκτυα προστροφοδότησης

Στην απλούστερη περίπτωση, ένα διασταυρωμένο νευρωνικό δίκτυο, δηλαδή ένα νευρωνικό δίκτυο του οποίου τα νευρόνια είναι οργανωμένα σε στρώματα, έχει ένα στρώμα εισόδου από κόμβους πηγής, το οποίο προβάλλεται πάνω σε ένα στρώμα νευρονίων εξόδου, αλλά όχι αντίστροφα. Ένα τέτοιο νευρωνικό δίκτυο είναι αυστηρά τύπου προστροφοδότησης (feedforward) (Σχήμα 7.6) και καλείται νευρωνικό δίκτυο προστροφοδότησης της μοναδικού στρώματος, όπου το μοναδικό στρώμα είναι το στρώμα των νευρονίων (υπολογιστικών κόμβων) εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι το στρώμα των κόμβων πηγής (εισόδου) δεν προσμετράται, γιατί δεν λαμβάνει χώρα κανένας υπολογισμός σε αυτό.

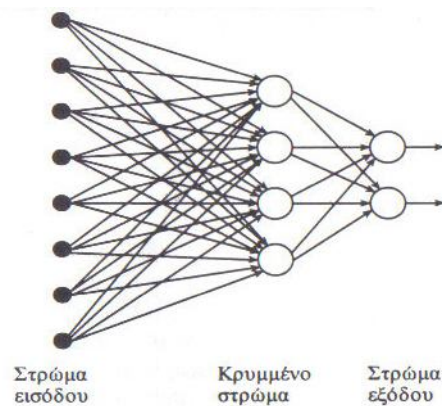


Σχήμα 7.6: Μονοστρωματικό νευρωνικό δίκτυο προστροφοδότησης με πέντε νευρόνια (κόμβους) εξόδου

Ένα τυπικό παράδειγμα μονοστρωματικού νευρωνικού δικτύου προστροφοδότησης είναι η γραμμική συσχετιστική μνήμη, η οποία αντιστοιχεί ένα διάνυσμα εξόδου σε ένα διάνυσμα εισόδου και αποθηκεύει την πληροφορία ως αλλαγές στα συναπτικά βάρη.

Στη γενική περίπτωση, ένα νευρωνικό δίκτυο προστροφοδότησης περιέχει ένα ή περισσότερα κρυμμένα στρώματα, των οποίων οι υπολογιστικοί κόμβοι είναι γνωστοί ως κρυμμένα νευρόνια ή κρυμμένες μονάδες και παρεμβαίνουν μεταξύ των εξωτερικών εισόδων και των εξόδων του νευρωνικού δικτύου. Στα δίκτυα αυτά που ονομάζονται πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα προστροφοδότησης, οι κόμβοι πηγής στο στρώμα εισόδου παρέχουν τα στοιχεία του διανύσματος δράσης τα οποία εισέρχονται ως είσοδοι στο πρώτο κρυμμένο στρώμα υπολογιστικών κόμβων. Ομοίως, οι εξοδοί των κόμβων του πρώτου κρυμμένου στρώματος εισέρχονται ως είσοδοι της κόμβους του δεύτερου κρυμμένου στρώματος, κ.ο.κ. Το τελικό στρώμα κόμβων δίνει τη συνολική απόκριση στα διανύσματα εισόδου.

Ένα παράδειγμα νευρωνικού δικτύου προσοτροφοδότησης με ένα κρυμμένο στρώμα τεσσάρων κόμβων ($h=4$), οκτώ κόμβους πηγής στο στρώμα εισόδου ($p=8$) και δύο κόμβους ($q=2$) στο στρώμα εξόδου εικονίζεται στο Σχήμα 7.7. Το δίκτυο αυτό αναφέρεται συμβολικά ως νευρωνικό δίκτυο προσοτροφοδότησης 8-4-2.



Σχήμα 7.7: Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο προσοτροφοδότησης 8-4-2 (με ένα κρυμμένο στρώμα)

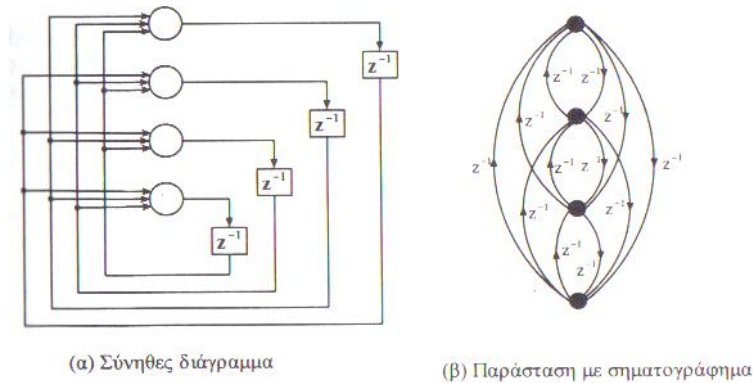
Το νευρωνικό δίκτυο του παραπάνω σχήματος ονομάζεται νευρωνικό δίκτυο πλήρως διασυνδεδεμένο, γιατί κάθε κόμβος οποιουδήποτε στρώματος συνδέεται με όλους της κόμβους του γειτονικού του της τα εμπρός στρώματος. Εάν αυτό δεν ισχύει, δηλαδή εάν λείπουν μερικοί σύνδεσμοι επικοινωνίας, τότε το νευρωνικό δίκτυο ονομάζεται μερικά διασυνδεδεμένο.

7.2.3. Αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (νευρωνικά δίκτυα ανατροφοδότησης)

Εάν το νευρωνικό δίκτυο περιέχει τουλάχιστο ένα βρόχο ανατροφοδότησης, ο οποίος ανακυκλώνει πληροφορία μέσω του ίδιου ή προηγούμενων στρωμάτων, τότε ονομάζεται αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο (recurrent) ή νευρωνικό δίκτυο ανατροφοδότησης. Το αποτέλεσμα της ανατροφοδότησης είναι ότι όταν ένα διάνυσμα εισόδου εισέρχεται στο δίκτυο, δεν παράγει ένα πρότυπο διάνυσμα εξόδου σε πεπερασμένο αριθμό χρονικών βημάτων, αλλά δρα με ένα κυκλικό τρόπο, όπου τα ίδια στρώματα ενεργοποιούνται επαναληπτικά. Εάν το νευρωνικό δίκτυο είναι αφ' εαυτού ευσταθές πιθανά να ταλαντωθεί για κάποιο χρονικό διάστημα προτού φθάσει σε μία σταθερή κατάσταση στην οποία οι νευρωνικές ενεργοποιήσεις θα σταματήσουν να αλλάζουν με αποτέλεσμα να

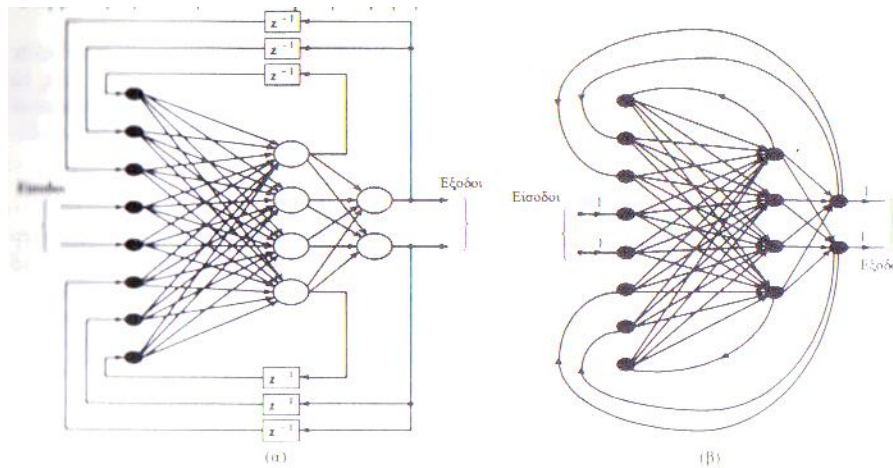
παραχθεί μια σταθερή έξοδος. Διαφορετικά, εάν το νευρωνικό δίκτυο δεν είναι ευσταθές, οι ταλαντώσεις θα συνεχίσουν αδιάκοπα. Συνεπώς, όταν εκπαιδεύουμε ένα αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο είναι σημαντικό να βρούμε το σύνολο των συναπτικών βαρών που του επιτρέπουν να σταθεροποιηθεί της επιθυμητές τιμές εξόδου.

Ένα παράδειγμα μονοστρωματικού αναδρομικού νευρωνικού δικτύου εικονίζεται στο Σχήμα 7.8, το οποίο δεν περιέχει αυτοβρόχους, δηλαδή ανατροφοδοτήσεις από κάποιον κόμβο στον εαυτό του. Οι βρόχοι ανατροφοδότησης κλείνουν μέσω μοναδιαίων καθυστερήσεων, οι οποίες συμβολίζονται με z^{-1} όπου $z^{-1}y(k)=y(k-1)$ και k παριστά διακριτό χρόνο. Το z^{-1} ονομάζεται στη θεωρία συστημάτων τελεστής μοναδιαίας καθυστέρησης.



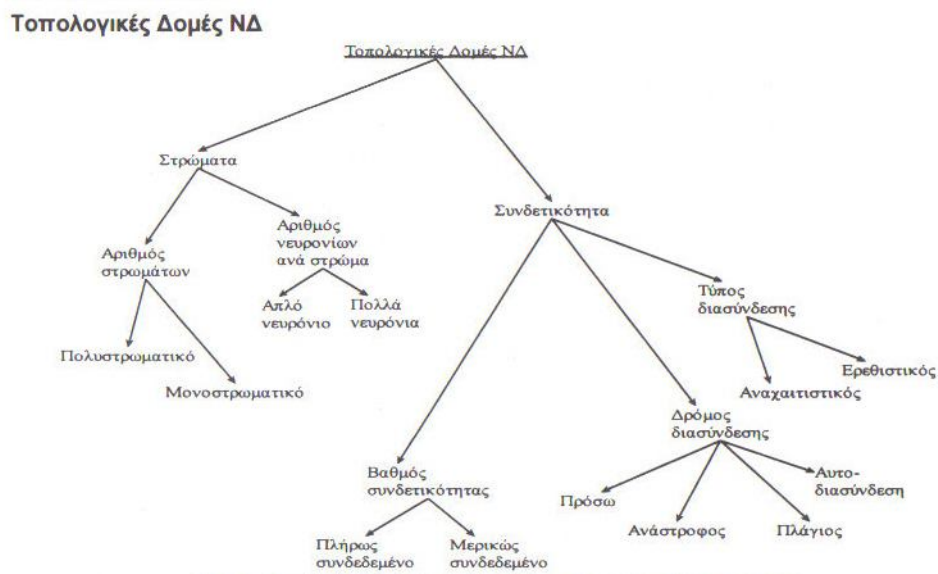
Σχήμα 7.8: Μονοστρωματικό αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο χωρίς αυτοβρόχους

Το νευρωνικό δίκτυο του παραπάνω σχήματος είναι μια περίπτωση των καλούμενων νευρωνικών δικτύων Hopfield. Ένα άλλο παράδειγμα αναδρομικού νευρωνικού δικτύου μπορεί να ληφθεί από το νευρωνικό δίκτυο προσοτροφοδότησης 8-4-2 του Σχήματος 7.7, αν κλείσουμε διάφορους βρόχους, της δείχνει το Σχήμα 7.9. Οι συνδέσεις ανατροφοδότησης μπορούν να ξεκινούν τόσο από της κρυμμένους κόμβους, όσο και από της κόμβους εξόδου. Σημειώνεται ότι οι βρόχοι ανατροφοδότησης έχουν μια ευεργετική επίδραση πάνω στη μάθηση και τη συνολική συμπεριφορά του νευρωνικού δικτύου.



Σχήμα 7.9: Αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο της κρυμμένου στρώματος (α) κλασική παράσταση, (β) παράσταση με σηματογράφημα

Το Σχήμα 7.10 συνοψίζει την ταξινόμηση της τοπολογίας των νευρωνικών δικτύων με βάση τα στρώματα κόμβων και τη συνδετικότητα.



Σχήμα 7.10: Ταξινόμηση των δομών των νευρωνικών δικτύων

7.3.Μάθηση των νευρωνικών δικτύων

7.3.1.Γενικά

Η μάθηση είναι μία θεμελιακή ικανότητα των νευρωνικών δικτύων, η οποία της επιτρέπει να μαθαίνουν από το περιβάλλον της και να βελτιώνουν τη συμπεριφορά της με το πέρασμα του χρόνου. Η μάθηση είναι μία γενική έννοια της επιστήμης των συστημάτων και ορίζεται με ποικίλους τρόπους ανάλογα με το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής. Στα νευρωνικά δίκτυα, η μάθηση αναφέρεται στη διεργασία επίτευξης μιας επιθυμητής συμπεριφοράς μέσω ανανέωσης της τιμής των συναπτικών βαρών. Έτσι, ένα νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει για το περιβάλλον του μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας ανανέωσης των συναπτικών βαρών και των κατωφλίων [2].

Αλγόριθμος μάθησης ή εκπαίδευσης είναι κάθε προκαθορισμένο σύνολο καλά ορισμένων κανόνων επίλυσης του προβλήματος μάθησης του νευρωνικού δικτύου. Γενικά, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι μάθησης στα νευρωνικά δίκτυα, καθένας από τους οποίους έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κάθε αλγόριθμος μάθησης προσφέρει έναν άλλο τρόπο προσαρμογής των συναπτικών βαρών.

Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά τη σπουδή και σχεδίαση του νευρωνικού δικτύου είναι το περιβάλλον στο οποίο εργάζεται κάθε νευρωνικό δίκτυο. Έτσι, διαφορετικά μοντέλα του περιβάλλοντος οδηγούν σε διαφορετικά παραδείγματα μάθησης, δηλαδή:

- επιβλεπόμενη (ενεργή) μάθηση
- ενισχυτική μάθηση
- μη επιβλεπόμενη (αυτό-οργανούμενη) μάθηση

Οι τέσσερις βασικοί τρόποι νευρωνικής μάθησης είναι οι ακόλουθοι:

- μάθηση διόρθωσης σφάλματος
- μάθηση Hebb
- ανταγωνιστική μάθηση
- μάθηση Boltzmann

7.3.2.Μάθηση διόρθωσης σφάλματος

Στον τύπο αυτό μάθησης η απαιτούμενη ανανέωση των συναπτικών βαρών υπολογίζεται παρουσιάζοντας στο νευρωνικό δίκτυο δεδομένα πρότυπα εισόδου, συγκρίνοντας της προκύπτουσες αποκρίσεις με της επιθυμητές αποκρίσεις και ακολούθως αλλάζοντας τα συναπτικά βάρη της την κατεύθυνση μείωσης του σφάλματος [3].

Συγκεκριμένα, έστω:

$d_k(t)$: η επιθυμητή έξοδος του k νευρόνιου στη διακριτή χρονική στιγμή t

$x(t)$: το διάνυσμα εισόδου που εφαρμόζεται στο στρώμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου

$y_k(t)$: η πρακτικά λαμβανόμενη απόκριση του k νευρόνιου

Προφανώς, το ζεύγος $(x(t), d_k(t))$ αποτελεί ένα παράδειγμα που παρουσιάζεται στο νευρόνιο κατά την χρονική στιγμή t . Το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής εξόδου $d_k(t)$ και της πραγματικής εξόδου $y_k(t)$ είναι:

$$e_k(t) = d_k(t) - y_k(t)$$

με βάση το οποίο ορίζουμε το ακόλουθο κριτήριο:

$$I = E \left\{ \frac{1}{2} \sum_k e_k^2(t) \right\} \quad (7.10)$$

το οποίο καλείται κριτήριο μέσω τετραγωνικού σφάλματος και εκφράζει την μέση τιμή του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων.

Το πρόβλημα μάθησης είναι τώρα να επιλεγούν τα συναπτικά βάρη των νευρονίων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό κριτήριο. Η ακριβής λύση του προβλήματος αυτού απαιτεί τη γνώση των στατικών ιδιοτήτων των στοχαστικών ανελίξεων που ενυπάρχουν σε κάθε περίπτωση. Γι' αυτό εδώ θα περιορισθούμε σε μια προσεγγιστική λύση ελαχιστοποιώντας το στιγμιαίο κριτήριο του τετραγωνικού σφάλματος:

$$J = \frac{1}{2} \sum_k e_k^2(t) \quad (7.11)$$

ως της τα συναπτικά βάρη w_{kj} του νευρωνικού δικτύου, όπου w_{kj} είναι το βάρος της σύναψης j του νευρόνιου k .

Ο κανόνας μάθησης, ο οποίος βασίζεται στη διόρθωση του σφάλματος είναι τότε:

$$\Delta w_{kj}(t) = \gamma e_k(t) x_j(t) \quad (7.12)$$

όπου $\Delta w_{kj}(t)$ είναι η ποσότητα αλλαγής στο χρόνο t του συναπτικού βάρους w_{kj} και γ είναι μια θετική σταθερά, η οποία καθορίζει τον ρυθμό μάθησης.

Ο προηγούμενος κανόνας μάθησης, ο οποίος είναι γνωστός στην βιβλιογραφία ως κανόνας μάθησης δέλτα, λέει ότι η διόρθωση του συναπτικού βάρους είναι ανάλογη του σφάλματος

$$e_k(t) = d_k(t) - y_k(t) \quad (7.13)$$

και του σήματος εισόδου $x_j(t)$ της υπό εξέταση σύναψης j .

Η ανανεωμένη τιμή $w_{kj}(t+1)$ του θεωρούμενου συναπτικού βάρους δίνεται από την σχέση:

$$W_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \Delta w_{kj}(t) \quad (7.14)$$

Για το ξεκίνημα του παραπάνω κανόνα μάθησης χρειαζόμαστε τη γνώση κάποιων αρχικών τιμών για τα βάρη στη χρονική στιγμή $t=0$. Εάν το νευρωνικό δίκτυο περιέχει μόνο γραμμικά στοιχεία επεξεργασίας, οπότε το J είναι ακριβώς τετραγωνικό, τότε ο αλγόριθμος μάθησης οδηγεί βήμα ενός βήμα στο ολικό ελάχιστο. Όταν, ενός, το νευρωνικό δίκτυο περιέχει μη γραμμικότητες, τότε το ολικό ελάχιστο δεν μπορεί να ληφθεί πάντοτε, γιατί ο αλγόριθμος μπορεί να παγιδευτεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

7.3.3.Μάθηση Hebb

Η μάθηση του τύπου αυτού (Εββιανή μάθηση) βασίζεται στην ονομαστή υπόθεση μάθησης του Hebb σύμφωνα με την οποία, όταν ενός άξονας ενός κυττάρου A είναι πολύ κοντά στο να ερεθίσει ένα κύτταρο B και επίμονα ή επαναληπτικά συμμετέχει στην πυροδότησή του, τότε λαβαίνει χώρα κάποια διεργασία ανάπτυξης ή μεταβολικών αλλαγών σε ένα ή και τα δύο κύτταρα, έτσι ώστε η αποδοτικότητα του A ως κυττάρου που πυροδοτεί το B να αυξάνει [4].

Η υπόθεση αυτή μπορεί να επαναδιατυπωθεί σε δύο μέρη ως εξής:

- α) Η δύναμη (βάρος) μιας σύναψης, τα νευρόνια ενός οποίας, σε οποιαδήποτε πλευρά ενός, ενεργοποιούνται συγχρόνως, αυξάνει επιλεκτικά.
- β) Η δύναμη (βάρος) μιας σύναψης, τα νευρόνια ενός οποίας, σε οποιαδήποτε πλευρά ενός, ενεργοποιούνται ασύγχρονα, μειώνεται ή εξαλείφεται επιλεκτικά.

Μια τέτοια σύναψη ονομάζεται σύναψη τύπου Hebb (Εββιανή σύναψη) και αυξάνει τη συναπτική αποδοτικότητα ως συνάρτηση ενός συσχετίσης ανάμεσα ενός προσυναπτικές και μετασυναπτικές δραστηριότητες. Αυτό γίνεται με τη χρήση ενός χρονικά εξαρτώμενου, ισχυρά τοπικού και ισχυρά αλληλεπιδρώντος μηχανισμού. Μια μη Εββιανή σύναψη δεν έχει τέτοιο μηχανισμό. Έστω w_{kj} ένα συναπτικό βάρος του k νευρονίου με προσυναπτική δραστηριότητα x_j και μετασυναπτική δραστηριότητα y_k . Τότε, σύμφωνα με την υπόθεση Hebb, η ανανέωση του w_{kj} σε χρόνο t έχει την μορφή:

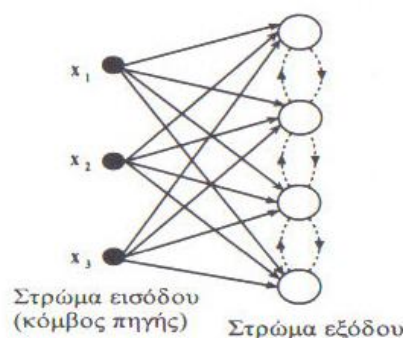
$$\Delta w_{kj}(t) = H(y_k(t), x_j(t)) \quad (7.15)$$

όπου H είναι μία συνάρτηση προς προσυναπτικής και μετασυναπτικής δραστηριότητας.

7.3.4. Ανταγωνιστική μάθηση

Ο όρος ανταγωνιστική οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε νευρόνιο ανταγωνίζεται με τα άλλα νευρόνια στο να αντιδράσει στην είσοδο που έρχεται από τα προηγούμενα στρώματα. Συνεπώς, σε αντίθεση με την Εββιανή μάθηση, στην οποία μπορεί να είναι ταυτόχρονα ενεργά πολλά νευρόνια εξόδου, στην ανταγωνιστική μάθηση μόνο ένα νευρόνιο εξόδου είναι ενεργό σε κάποια χρονική στιγμή. Ακριβώς στο γεγονός αυτό οφείλεται η ικανότητα προς ανταγωνιστικής μάθησης να εξάγει ιδιότητες και να ταξινομεί εισόδους επιτυχώς. Το νευρόνιο που κερδίζει στον ανταγωνισμό ονομάζεται νευρόνιο-νικητής. Στην ανταγωνιστική μάθηση επιβάλλεται ένα άνω όριο δύναμης σε κάθε νευρόνιο και προς, όλα τα νευρόνια είναι τα ίδια εκτός από το ότι υπάρχουν ορισμένα τυχαία κατανεμημένα συναπτικά βάρη που αποκρίνονται διαφορετικά σε ένα δεδομένο σύνολο προτύπων εισόδου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στα νευρόνια να ειδικευθούν στη μάθηση συνόλων όμοιων προτύπων και έτσι να ενεργούν ως ανιχνευτές ιδιοτήτων.

Για να αποσαφηνίσουμε πως λειτουργεί η ανταγωνιστική μάθηση θεωρούμε το μονοστρωματικό νευρωνικό δίκτυο του Σχήματος 7.11, το οποίο περιλαμβάνει πλευρικές διασυνδέσεις που δρουν απαγορευτικά. Αυτό σημαίνει ότι κάθε νευρόνιο τείνει να αναστείλει τη δράση του νευρονίου με το οποίο συνδέεται πλευρικά. Οι προς συναπτικές διασυνδέσεις δρουν διεγερτικά .



Σχήμα 7.11: Δομή νευρωνικού δικτύου για ανταγωνιστική μάθηση. Οι συνάψεις προσοτροφοδότησης είναι διεγερτικές, ενώ οι παράπλευρες συνάψεις είναι απαγορευτικές.

Το νευρόνιο k είναι ένα νευρόνιο νικητής, εάν η στάθμη u_j προς εσωτερικής του δραστηριότητας είναι μεγαλύτερη από όλα τα άλλα νευρόνια του νευρωνικού δικτύου για μια συγκεκριμένη μορφή εισόδου $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$.

Το σήμα εξόδου y_k του k νευρονίου νικητή τοποθετείται στην τιμή 1, ενώ για όλα τα άλλα νευρόνια που απέτυχαν στον ανταγωνισμό, οι εξοδοι τίθενται στην τιμή 0. Κάθε νευρόνιο λαβαίνει μια σταθερή ποσότητα θετικού συναπτικού βάρους, το οποίο κατανέμεται προς κόμβους εισόδου, έτσι ώστε:

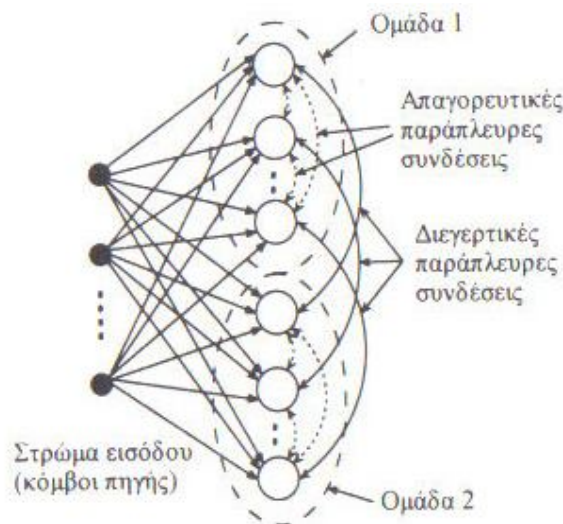
$$\sum_j w_{kj} = 1 \quad \text{για όλα τα } k$$

Ο απλούστερος κανόνας ανταγωνιστικής μάθησης είναι $\Delta w_{kj} = \gamma(x_j - w_{kj})$ για νευρόνιο k , το οποίο κερδίζει και $\Delta w_{kj} = 0$, εάν το νευρόνιο k χάνει. Το γ είναι η παράμετρος του ρυθμού μάθησης.

Προφανώς, ο κανόνας προς προσπαθεί να μεταθέσει το διάνυσμα των συναπτικών βαρών $w_k = [w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}]^T$ του νευρονίου νικητή προς το διάνυσμα εισόδου x , ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση στιγμιαίου τετραγωνικού σφάλματος:

$$J = \frac{1}{2} (x - w_k)^T (x - w_k) = \frac{1}{2} \sum_j (x_j - w_{kj})^2 \quad (7.16)$$

Ένα πιο πολύπλοκο νευρωνικό δίκτυο ανταγωνιστικής μάθησης εικονίζεται στο Σχήμα 7.12.



Σχήμα 7.12: Ένα πολύπλοκότερο νευρωνικό δίκτυο ανταγωνιστικής μάθησης στο οποίο υπάρχουν ομάδες κόμβων εξόδου

Εδώ οι κόμβοι του στρώματος εξόδου διαμερίζονται σε έναν αριθμό μη επικαλυπτόμενων ομάδων, κάθε μια από τις οποίες είναι κατάλληλη για την αναγνώριση μιας κατηγορίας ιδιοτήτων. Οι παράπλευρες συνδέσεις των κόμβων στις ομάδες είναι απαγορευτικές, ενώ οι παράπλευρες συνάψεις των κόμβων που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες και οι συνάψεις προσοτροφοδότησης μεταξύ των στρωμάτων είναι συνάψεις διέγερσης.

Μέσα σε κάθε ομάδα κόμβων μόνο ο κόμβος που λαβαίνει το μεγαλύτερο σήμα εισόδου πετυχαίνει τη μέγιστη τιμή του, ενώ όλοι οι άλλοι κόμβοι απωθούνται στην ελάχιστη τιμή στις. Η μάθηση λαβαίνει χώρα μόνο στον κόμβο νικητή. Κάθε κόμβος έχει ένα σταθερό άθροισμα συναπτικών βαρών εισόδου. Στις παράπλευρες απαγορευτικές συνδέσεις δεν λαβαίνει χώρα μάθηση.

7.3.5.Μάθηση Boltzmann

Η μάθηση αυτή είναι μια μορφή στοχαστικής μάθησης, η οποία αναπτύχθηκε από τον Boltzmann με μεθόδους θερμοδυναμικής [5]. Χρησιμοποιείται στη μηχανή Boltzmann, η οποία είναι κατά βάση ένα αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο, τα νευρόνια του οποίου λειτουργούν δυαδικά, δηλαδή έχουν δύο επιτρεπτές καταστάσεις, την κατάσταση ON και την κατάσταση OFF. Έστω s_i η κατάσταση του νευρονίου i και w_{ji} το συναπτικό βάρος που συνδέει τα νευρόνια i και j . Τότε, ορίζουμε την εξής ενεργειακή συνάρτηση:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} w_{ji} s_j s_i \quad (7.17)$$

όπου η συνθήκη $i \neq j$ δηλώνει ότι καθένα νευρόνιο της μηχανής δεν έχει αυτοανατροφοδότηση. Τα νευρόνια της μηχανής χωρίζονται σε δύο ομάδες, στα ορατά νευρόνια που παρέχουν μια διεπαφή μεταξύ του νευρωνικού δικτύου και του περιβάλλοντός του και στα κρυμμένα νευρόνια, που λειτουργούν πάντα ελεύθερα. Η μηχανή Boltzmann λειτουργεί με δύο διακριτούς τρόπους, δηλαδή:

- υπό συνθήκες σύσφιξης και
- υπό συνθήκες ελεύθερης λειτουργίας

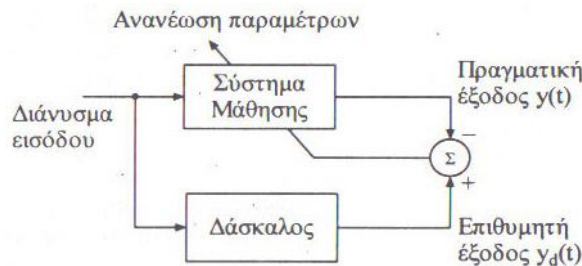
Στον πρώτο τρόπο λειτουργίας, όλα τα ορατά νευρόνια συσφίγγονται σε συγκεκριμένες καταστάσεις που καθορίζονται από το περιβάλλον, ενώ στο δεύτερο όλα τα νευρόνια (ορατά και κρυμμένα) επιτρέπονται να λειτουργούν ελεύθερα. Ο κανόνας μάθησης Boltzmann είναι ο εξής:

$$\Delta w_{ji} = \gamma(r_{ji}^+ - r_{ji}^-), i \neq j \quad (7.18)$$

όπου r_{ji}^+ είναι η συσχέτιση ανάμεσα της καταστάσεις των νευρονίων i και j υπό συνθήκες σύσφιγξης και r_{ji}^- είναι η συσχέτιση μεταξύ των καταστάσεων του νευρονίου i και του νευρονίου j υπό συνθήκες ελεύθερης λειτουργίας. Η μάθηση Boltzmann χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μόνο τοπικές παρατηρήσεις κάτω από της δύο διακεκριμένες κατηγορίες συνθηκών λειτουργίας: κλειδωμένη και ελεύθερη.

7.3.6.Επιβλεπόμενη μάθηση

Η δομή της επιβλεπόμενης ή ενεργού μάθησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα και περιλαμβάνει δύο κύριες συνιστώσες, δηλαδή τον δάσκαλο και το σύστημα μάθησης.



Σχήμα 7.13: Δομή της επιβλεπόμενης μάθησης

Το κύριο χαρακτηριστικό της επιβλεπόμενης μάθησης είναι η ύπαρξη του εξωτερικού δασκάλου, ο οποίος με βάση την γνώση και την εμπειρία του είναι ικανός να διδάξει στο σύστημα μάθησης της επιθυμητές εξόδους για ένα σύνολο εισόδων εκπαίδευσης [6]. Όταν ο δάσκαλος και το νευρωνικό δίκτυο λαμβάνουν ένα διάνυσμα εισόδου εκπαίδευσης, ο δάσκαλος δίνει στο νευρωνικό δίκτυο μια επιθυμητή έξοδο, η οποία παριστά την βέλτιστη ενέργεια που πρέπει να κάνει το νευρωνικό δίκτυο. Οι παράμετροι του νευρωνικού δικτύου ανανεώνονται με βάση τόσο του διανύσματος εκπαίδευσης, όσο και του σήματος σφάλματος, δηλαδή την διαφορά μεταξύ της πραγματικής απόκρισης $y(t)$ και της επιθυμητής απόκρισης $y_d(t)$ του δικτύου. Ορίζοντας μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους:

$$J(w) = \frac{1}{2} E[(y(t) - y_d(t))^2] \quad (7.19)$$

όπου w είναι το διάνυσμα των της επιλογή παραμέτρων του συστήματος μάθησης. Η βήμα της βήμα ανανέωση των παραμέτρων κάνει τελικά το νευρωνικό δίκτυο μάθησης να

μιμείται τον δάσκαλο. Δύο περιπτώσεις αλγορίθμων επιβλεπόμενης μάθησης είναι ο αλγόριθμος Ελαχίστου Μέσου Τετραγώνου και η γενίκευσή του, που θα είναι γνωστή ως Αλγόριθμος Ανάστροφης Διάδοσης.

7.3.7.Μη επιβλεπόμενη μάθηση

Στον τύπο αυτό μάθησης, που καλείται και αυτοοργανούμενη μάθηση, δεν χρησιμοποιείται εξωτερικός δάσκαλος για να επιβλέψει την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Το νευρωνικό δίκτυο αντί να μάθει συγκεκριμένα παραδείγματα εισόδου-εξόδου, μαθαίνει ένα ανεξαρτήτων-καθηκόντων μέτρο της ποιότητας της παράστασης. Οι της επιλογή ελεύθερες παράμετροι του δικτύου προσαρμόζονται, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί το μέτρο αυτό. Πρακτικά, το μόνο που χρειάζεται ένα νευρωνικό δίκτυο μη επιβλεπόμενης μάθησης είναι να συντονισθεί της στατιστικές ομαλότητες των δεδομένων εισόδου και μετά να μπορέσει να δημιουργήσει εσωτερικές παραστάσεις για την κωδικοποίηση των ιδιοτήτων εισόδου και να παράγει αυτόματα νέες κατηγορίες.

Η μη επιβλεπόμενη μάθηση μπορεί να συνδυασθεί με την επιβλεπόμενη μάθηση σε ένα πολυστρωματικό δίκτυο προσοτροφοδότησης εκπαιδευόμενο με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης, για να επιταχύνει τη διαδικασία μάθησης.

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης, που είναι αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης, περιλαμβάνει μια φάση της τα εμπρός κατά την οποία τα σήματα εισόδου διανύουν το νευρωνικό δίκτυο στρώμα με στρώμα από την είσοδο της την έξοδο παράγοντας τελικά μια απόκριση, και μια φάση της τα πίσω κατά την οποία τα σήματα σφάλματος διαδίδονται ανάστροφα. Κατά την φάση της τα πίσω, οι ελεύθερες παράμετροι του νευρωνικού δικτύου επιλέγονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται τον υπολογισμό N^L συναπτικών βαρών, όπου N είναι ο μέσος αριθμός των εισερχόμενων νευρωνικών διασυνδέσεων και L το πλήθος των στρωμάτων του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος εκπαίδευσης του δικτύου αυξάνει εκθετικά και ότι η διαδικασία μάθησης μπορεί να καταστεί απαγορευτικά αργή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αποφευχθεί εάν χρησιμοποιηθεί της αλγόριθμος μη επιβλεπόμενης μάθησης. Για παράδειγμα, εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο μη επιβλεπόμενης μάθησης με ένα ακολουθιακό τρόπο, σε ένα στρώμα κάθε φορά, μπορεί να είναι δυνατή η εκπαίδευση μεγάλων πολυστρωματικών δικτύων σε χρόνο, ο οποίος είναι ανάλογος του αριθμού των στρωμάτων.

7.3.8.Ενισχυτική μάθηση

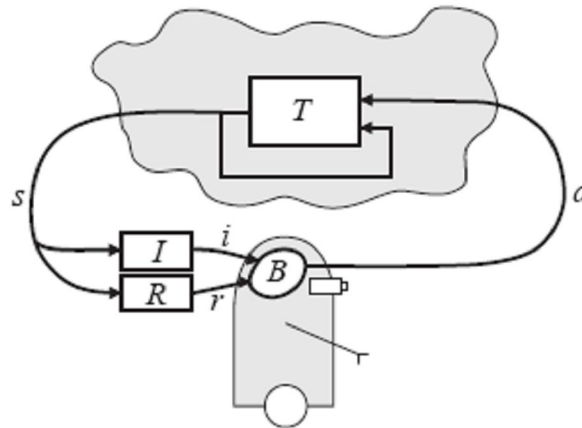
7.3.8.1.Εισαγωγή

Ο όρος ενισχυτική μάθηση αναφέρθηκε πρώτη φορά στην τεχνητή νοημοσύνη από τον Minski (1961) και ανεξάρτητα στη θεωρία ελέγχου από της Waltz και Fu το ίδιο έτος. Έστω ένα σύστημα, το οποίο δίνει μια απόκριση με βάση της παρούσες συνθήκες [7]. Τότε, η αρχή της ενίσχυσης αναφέρεται στην αύξηση της πιθανότητας να λάβουμε την ίδια απόκριση κάτω από παρόμοιες συνθήκες. Σήμερα, η ενισχυτική μάθηση θεωρείται ως μία κατηγορία μεθόδων και αλγορίθμων που βασίζονται στην αρχή αυτή. Η υλοποίηση της ενισχυτικής μάθησης στα νευρωνικά δίκτυα ακολουθεί της, την αρχή αυτή. Οι δράσεις του νευρωνικού δικτύου επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Μια μονάδα κριτικής στέλνει πίσω στο νευρωνικό δίκτυο ένα ενισχυτικό σήμα ανατροφοδότησης, πληροφορώντας το σύστημα πόσο καλή είναι η παρούσα συμπεριφορά του. Χρησιμοποιώντας το σήμα αυτό, το νευρωνικό δίκτυο προσαρμόζει τον κανόνα παραγωγής των δράσεων του μέσω της ανανέωσης των συναπτικών βαρών του και παράγει μια άλλη δράση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος. Η ενισχυτική μάθηση είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται από ένα πράκτορα, ο οποίος πρέπει να μάθει τη σωστή συμπεριφορά μέσα από δοκιμές με ένα δυναμικό περιβάλλον. Υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ενισχυτικής μάθησης. Η πρώτη είναι να ψάξει ο πράκτορας στο χώρο των συμπεριφορών που έχουμε ορίσει στο σύστημα και να βρει μία που να λειτουργεί καλά μέσα στο περιβάλλον. Η προσέγγιση αυτή έχει βρει πρόσφορο έδαφος της γενετικούς αλγορίθμους και στο γενετικό προγραμματισμό. Η δεύτερη είναι να γίνει χρήση στατιστικών τεχνικών και μεθόδων δυναμικού προγραμματισμού, ώστε να υπολογιστεί η χρησιμότητα της επιλογής όλων των δράσεων της καταστάσεις του περιβάλλοντος που έχουμε ορίσει.

Αν και η ενισχυτική μάθηση είναι θεμελιακά όμοια με την επιβλεπόμενη μάθηση η σημαντική διαφορά είναι ότι το νευρωνικό δίκτυο, αντί να λαμβάνει την ορθή απόκριση από ένα δάσκαλο, λαμβάνει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του, για να δει πόσο καλά έχει εργασθεί μετά την παρουσίαση σε αυτό μιας ακολουθίας πολλαπλών προτύπων εκπαίδευσης. Το πλεονέκτημα του γεγονότος αυτού, είναι ότι το νευρωνικό δίκτυο δεν χρειάζεται να γνωρίζει επακριβώς την ορθή απάντηση για κάθε ζεύγος προτύπων εισόδου-εξόδου.

7.3.8.2. Μοντέλο ενισχυτικής μάθησης

Στο κλασσικό μοντέλο ενισχυτικής μάθησης, της πράκτορας συνδέεται στο περιβάλλον μέσω της αντίληψης και της δράσης, της απεικονίζεται στο Σχήμα 7.14.



Σχήμα 7.14: Κλασσικό μοντέλο ενισχυτικής μάθησης

Σε κάθε βήμα της αλληλεπίδρασης, ο πράκτορας λαμβάνει σαν είσοδο i κάποια ένδειξη της παρούσας κατάστασης s του περιβάλλοντος. Έπειτα, ο πράκτορας επιλέγει μία δράση a για να δημιουργήσει έξοδο. Η δράση αλλάζει την κατάσταση του περιβάλλοντος και η αποτίμηση αυτής της αλλαγής κατάστασης δίδεται στον πράκτορα σαν ενίσχυση r . Η συμπεριφορά του πράκτορα B θα έπρεπε να επιλέγει δράσεις που τείνουν να αυξάνουν το μακροπρόθεσμο άθροισμα των τιμών του σήματος ενίσχυσης. Μπορεί να μάθει να το κάνει αυτό, έπειτα από συστηματικές προσπάθειες, καθοδηγούμενες από μία μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων.

Τυπικά το μοντέλο αποτελείται από :

- Ένα διακριτό σύνολο καταστάσεων του περιβάλλοντος, S
- Ένα διακριτό σύνολο δράσεων του πράκτορα, A
- Ένα σύνολο γραμμικών σημάτων ενίσχυσης, συνήθως $\{0,1\}$ ή πραγματικών αριθμών

Στο Σχήμα 7.14, της, φαίνεται μία συνάρτηση εισόδου I , η οποία καθορίζει πως ο πράκτορας βλέπει την εκάστοτε κατάσταση του περιβάλλοντος. Συνήθως, θεωρείται πως αυτή είναι και η ταυτοτική συνάρτηση, ότι δηλαδή ο πράκτορας έχει αντίληψη της ακριβούς κατάστασης του περιβάλλοντος.

Της από της βασικές μεθόδους ενισχυτικής μάθησης είναι η «μάθηση χρονικής διαφοράς», η «μάθηση προσαρμοστικής ευρετικής κριτικής» και η «μάθηση Q» για την οποία θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση παρακάτω.

7.3.9. Το μοντέλο μάθησης Q

Το μοντέλο της μάθησης Q της δίνει έναν απλό τρόπο επίλυσης προβλημάτων Μαρκοβιανής δράσης με ατελή πληροφορία, ο οποίος βασίζεται στη συνάρτηση «δράσης-αποτίμησης» Q που απεικονίζει τα ζεύγη «κατάστασης-δράσης» σε αναμενόμενες τιμές κόστους (επαίνου).

Η ενισχυτική μάθηση Q χρησιμοποιεί μία μονάδα μνήμης για τα ζεύγη κατάστασης s και δράσης a σε αντίθεση με την ενισχυτική μάθηση προσαρμοστικής ευρετικής, η οποία χρειάζεται δύο βασικές μονάδες μνήμης, μία για την συνάρτηση αποτίμησης και μια για την πολιτική. Από το άλλο μέρος, της, η μάθηση Q είναι πιο πολύπλοκη στον υπολογισμό της πολιτικής από της τιμές Q. Ο στόχος της συνάρτησης Q είναι η εκτίμηση των τιμών της συνάρτησης κόστους μιας βέλτιστης πολιτικής. Η τιμή V(s) της συνάρτησης αξιολόγησης μιας κατάστασης s μπορεί να ορισθεί ως η τιμή Q(s,δ) του καλύτερου ζεύγους «κατάσταση-δράση», δηλαδή:

$$V(s) = \max Q(s, \alpha) \quad (7.20)$$

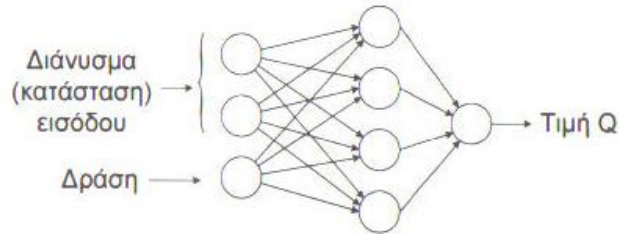
Η βέλτιστη πολιτική είναι:

$$\pi(s) = \{ \delta | V(s) = \max Q(s, a) \} \quad (7.21)$$

Της πρώτους κύκλους της μάθησης, οι τιμές της Q μπορεί να μην αντανακλούν με ακρίβεια την πολιτική που υποτίθεται ότι ορίζουν. Αλλά δοκιμάζοντας της της δράσεις σε της της καταστάσεις επανειλημμένα, το σύστημα μαθαίνει ποιες δράσεις είναι οι καλύτερες συνολικά, με βάση τον μακροπρόθεσμο έπαινο, ο οποίος φυσικά υπόκειται στη διαδικασία της έκπτωσης. Με άλλα λόγια, το τρέχον Q(s,a) είναι η αναμενόμενη τιμή Q που προκύπτει από την εφαρμογή της δράσης a στην κατάσταση s και ακολούθως, τη χρήση βέλτιστων δράσεων σε της της μελλοντικές καταστάσεις.

7.3.9.1. Υλοποίηση του μοντέλου μάθησης Q

Το μοντέλο μάθησης Q μπορεί να υλοποιηθεί με ένα νευρωνικό δίκτυο, το οποίο ονομάζουμε Q-νευρωνικό δίκτυο.



Σχήμα 7.15: Ένα νευρωνικό δίκτυο υλοποίησης της μάθησης Q

Ο αλγόριθμος μάθησης Q βασίζεται στον ορισμό της συνάρτησης Q. Ένας πράκτορας, επαναληπτικά, υπολογίζει τις τιμές της συνάρτησης Q. Σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου ο πράκτορας παρατηρεί την παρούσα κατάσταση s , επιλέγει μία δράση a , εκτελεί αυτή την δράση a και έπειτα παρατηρεί την ανταμοιβή $r=r(s,a)$ και την νέα κατάσταση $s'=\delta(s,a)$. Στην συνέχεια ενημερώνει την αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης Q, που συμβολίζεται με Q' , σύμφωνα με τον εξής κανόνα εκπαίδευσης:

$$Q'(s, \alpha) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, \alpha) + \alpha(r + \gamma \max_{\alpha'} Q'(s, \alpha')) \quad (7.22)$$

όπου $\alpha \in [0,1)$ είναι η παράμετρος του ρυθμού μάθησης

Ο αλγόριθμος μάθησης όπως Q-νευρωνικού δικτύου είναι ο ακόλουθος:

Για όλες τις καταστάσεις s στο S και για όλες τις δράσεις a στο A αρχικοποίησε την $Q(s,a)$ σε αυθαίρετη τιμή.

ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ (για κάθε προσπάθεια)

Αρχικοποίησε την παρούσα κατάσταση s

ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ (για κάθε βήμα όπως προσπάθειας)

Παρατήρησε την παρούσα κατάσταση s

Διάλεξε μία δράση a ακολουθώντας μια πολιτική π

Εκτέλεσε τη δράση a

Λάβε μια άμεση ανταμοιβή r

Παρατήρησε τη νέα κατάσταση s'

Ανανέωσε την $Q(s,a)$ σύμφωνα με την εξίσωση (7.22)

$s \leftarrow s'$

ΜΕΧΡΙ η s να είναι τελική κατάσταση

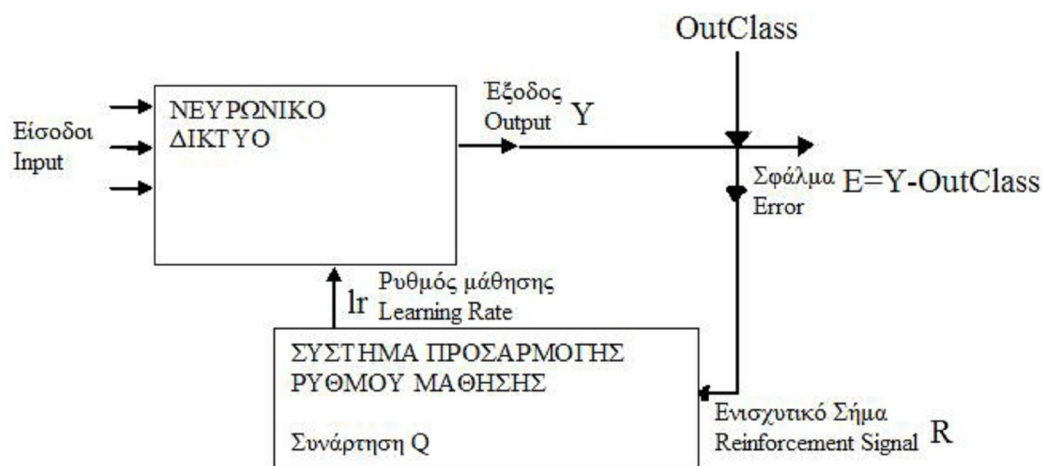
Μια επιλεγείσα δράση οδηγεί συνήθως στη βέλτιστη πολιτική $\pi(s)$, όπως παρουσιάζεται στην (1), αλλά ορισμένες φορές φθάνει σε εναλλακτική πολιτική. Για παράδειγμα, η πολιτική υλοποιείται στοχαστικά σύμφωνα με την ακόλουθη πολιτική Boltzmann:

$$Pr o(a_i) = \frac{\exp\left[\frac{Q(s, a_i)}{T}\right]}{\sum_k \exp\left[\frac{Q(s, a_k)}{T}\right]} \quad (7.23)$$

όπου T είναι η παράμετρος θερμοκρασίας για μια διαδικασία ανάπτησης.

7.3.9.2. Ανάπτυξη του μοντέλου

Το μοντέλο, το οποίο μελετάμε, είναι ένας ταξινομητής, ο οποίος δέχεται εισόδους που απαρτίζονται από διαφορετικά χαρακτηριστικά στοιχεία κάποιου συνόλου δεδομένων και οι οποίες καταλήγουν στους νευρώνες του κρυμμένου στρώματος του νευρωνικού δικτύου. Κατόπιν, οι νευρώνες αυτοί συνδυάζονται και ορίζουν την έξοδο, η οποία αντιστοιχεί στην κατηγορία που ανήκουν κάθε ένα από τα πρότυπα εισόδου [8]. Το μοντέλο, το οποίο δημιουργήσαμε κατά τα πρότυπα της ενισχυτικής μάθησης, έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 7.16.



Σχήμα 7.16: Δομή συστήματος προσαρμογής ρυθμού μάθησης

Το νευρωνικό δίκτυο στο οποίο δουλεύουμε επιλέχτηκε να έχει 7 νευρώνες, ώστε να είναι δύσκολο το έργο της εφαρμογής, αλλά και να έχει αυτή αποτελέσματα σε ένα περιβάλλον πιο δύσκολο. Επιπλέον, η παρουσία παραπάνω νευρώνων θα επιβάρυνε την ταχύτητα της εφαρμογής, παράγοντας, ο οποίος θεωρείται σημαντικός.

Η συνάρτηση εκπαίδευσης που χρησιμοποιούμε βασίζεται στον κανόνα της πιο απότομης κλίσης. Τα βάρη (weights) και οι πολώσεις (biases) αρχικοποιούνται σε τυχαίες τιμές, ενώ η ανανέωση των τιμών τους γίνεται στην κατεύθυνση της αρνητικής παραγώγου του τετραγωνικού σφάλματος. Ο ρυθμός μάθησης πολλαπλασιάζεται με την αρνητική αυτή κλίση για να καθοριστούν οι αλλαγές στα βάρη και τις πολώσεις. Όσο μεγαλύτερος γίνεται ο ρυθμός μάθησης, τόσο μεγαλύτερο είναι το βήμα. Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της φουρνιάς προτύπων (batch training), δηλαδή η εκπαίδευση βασίζεται σε ολόκληρο το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης που ονομάζεται εποχή (epoch). Κατά αυτή την έννοια, η ανανέωση των βαρών γίνεται αφού παρουσιαστούν στο δίκτυο όλα τα διατιθέμενα παραδείγματα εκπαίδευσης.

Η έξοδος του νευρωνικού δικτύου συγκρίνεται για κάθε πρότυπο και έτσι βρίσκεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε εποχή-φουρνιά. Στόχος φυσικά είναι το σφάλμα αυτό να ελαχιστοποιηθεί. Ακριβώς για αυτό το λόγο επιλέγεται και το σφάλμα κάθε φουρνιάς να αποτελέσει και τον καθοριστικό παράγοντα της ανταμοιβής από το περιβάλλον.

7.3.9.3. Το σύστημα ενισχυτικής μάθησης

Σε ένα σύστημα ενισχυτικής μάθησης προέχει να καθοριστεί το σήμα ενίσχυσης από το περιβάλλον και πως αυτό θα ορίζεται και θα δίνεται [9]. Στην περίπτωση μας, μία καλή περίπτωση είναι η χρήση του σφάλματος της εξόδου σαν ανταμοιβή από το περιβάλλον. Ο πράκτορας θα βλέπει αν το σφάλμα που έχει στην έξοδό του το μοντέλο, ύστερα από την εκπαίδευση, είναι μεγάλο ή μικρό και ανάλογα θα δίνει την ανταμοιβή ή την τιμωρία. Επειδή, όμως, είναι αρκετά ασαφές ποιο σφάλμα θεωρείται μεγάλο και ποιο σφάλμα θεωρείται μικρό, χρησιμοποιείται ένα πιο συγκεκριμένο μέτρο σύγκρισης, το οποίο είναι η διαφορά σφάλματος ανάμεσα στην τρέχουσα και στην προηγούμενη εποχή. Αυτό σημαίνει πως αν το σφάλμα μειωθεί ανάμεσα σε δύο εποχές, τότε αυτό είναι ένα σημάδι πως η δράση, η οποία επιλέχθηκε από το σύστημα με τη βοήθεια του πράκτορα, ήταν σωστή και είχε καλό αποτέλεσμα για το δίκτυο, συνεπώς και πρέπει να ανταμειφθεί. Αντίστοιχα, αν το

σφάλμα αυξηθεί ανάμεσα σε δύο εποχές, τότε η προηγούμενη επιλεγθείσα πράξη δεν ήταν καλή και συνεπώς, πρέπει να δοθεί μία ποινή τιμωρίας.

Το επίπεδο της ανταμοιβής ή της τιμωρίας καθορίζεται από το περιβάλλον ανάλογα με την διαφορά του σφάλματος των δύο εποχών και επομένως, διαχωρίζουμε τρεις κατηγορίες του σήματος ενίσχυσης:

- *Μείωση σφάλματος* : ανταμοιβή ανάλογη της απόλυτης τιμής του μεγέθους της μείωσης αυτής
- *Αύξηση σφάλματος* : τιμωρία ανάλογη της αύξησης αυτής
- *Σταθερό σφάλμα* : Η περίπτωση αυτή σπάνια παρατηρείται μιας και είναι σχετικά δύσκολο το σφάλμα σε δύο διαδοχικές εποχές να μείνει απόλυτα σταθερό, παρόλα αυτά πρέπει να καλυφθεί. Σε αυτή την περίπτωση η ανταμοιβή είναι μηδενική.

Μία τελευταία βελτίωση που έγινε στο θέμα του σήματος ενίσχυσης ήταν να γίνει ακόμη μεγαλύτερος διαχωρισμός των κατηγοριών ανάλογα με το ποσοστό της αύξησης ή μείωσης του σφάλματος. Αν η μεταβολή του σφάλματος ξεπερνούσε κάποιο ποσοστό, το οποίο εμείς καθορίζουμε, τότε σημαίνει πως η μεταβολή που επήλθε είναι πολύ σημαντική σε μέγεθος και επομένως πρέπει το σύστημα να ανταμειφθεί ή να τιμωρηθεί περισσότερο απ' ό,τι αν η μεταβολή ήταν μικρότερη. Έτσι τελικά, καταλήγουμε σε 5 κατηγορίες του σήματος ενίσχυσης ανάλογα με τη διαφορά σφάλματος ($\Delta\Sigma$) και το ποσοστό της μεταβολής (ΠΜ) :

Με X συμβολίζουμε το ποσοστό που εμείς ορίζουμε ότι πάνω από αυτό θεωρείται μία μεταβολή μεγάλη.

| Διαφορά Σφάλματος | Ποσοστό Μεταβολής | Ενισχυτικό Σήμα |
|-------------------|-------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| < 0 | > X | Μεγάλο θετικό |
| < 0 | < X | Μικρό θετικό |
| > 0 | > X | Μεγάλο αρνητικό |
| > 0 | < X | Μικρό αρνητικό |

Προφανώς το ενισχυτικό σήμα, προκύπτει με πολλαπλασιασμό της διαφοράς σφάλματος με κάποιον παράγοντα, ανάλογα με το σε ποια κατηγορία από αυτές του παραπάνω πίνακα βρισκόμαστε. Η πειραματική διαδικασία με διάφορα σύνολα δεδομένων υπέδειξε σαν τιμές ικανές να δημιουργήσουν “καλές” και “κακές” ενισχύσεις, τους παράγοντες 3,2,-3,-2 αντίστοιχα για τις κατηγορίες του πίνακα. Επίσης, χρειάζεται μία σημαντική τάξη μεγέθους, ώστε να μπορέσουμε να έχουμε τιμές της συνάρτησης Q που θα είναι πιο κοντά σε φυσικούς αριθμούς, διαδικασία που διευκολύνει την παρατήρηση και τους υπολογισμούς και έτσι καταλήγουμε στην ακόλουθη ακριβή μορφή για το ενισχυτικό σήμα :

$$\text{Reinf} = \begin{cases} 0, \Delta\Sigma = 0 \\ 30 \cdot |\Delta\Sigma|, \Delta\Sigma < 0 \text{ και } \text{ΠΜ} > X \\ 20 \cdot |\Delta\Sigma|, \Delta\Sigma < 0 \text{ και } \text{ΠΜ} < X \\ -20 \cdot |\Delta\Sigma|, \Delta\Sigma > 0 \text{ και } \text{ΠΜ} < X \\ -30 \cdot |\Delta\Sigma|, \Delta\Sigma > 0 \text{ και } \text{ΠΜ} > X \end{cases}$$

όπου χρησιμοποιούμε τους συμβολισμούς

Reinf : για το ενισχυτικό σήμα
 $\Delta\Sigma$: διαφορά σφάλματος
 ΠΜ : ποσοστό μεταβολής

Τέλος, αξίζει να γίνει μία αναφορά στη συνάρτηση Q και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανανέωσή της. Η μορφή της είναι ως εξής :

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha(\text{REINF} + \gamma \cdot \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a))$$

όπου :

- $Q(s, a)$: συνάρτηση τιμών Q
- α : ρυθμός μάθησης πράκτορα
- REINF : ενισχυτικό σήμα
- γ : παράγοντας έκπτωσης
- s' : η επόμενη κατάσταση από την s , με επιλογή της δράσης a .

7.4.Ανάπτυξη του μοντέλου

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και αφορούσε την εκμάθηση νευρωνικού δικτύου με την μέθοδο της ενισχυτικής μάθησης (Q μάθηση) εφαρμόζεται σε αυτήν την παράγραφο για την εξαγωγή πιθανοτήτων καταστροφής αλεξικέραυνων από κεραυνικές υπερτάσεις. Συγκεκριμένα, πειραματικές τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση των γραμμών μεταφοράς με την βοήθεια του Simulink (βλέπε Κεφάλαιο 5) χρησιμοποιούνται για την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου. Μετά την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου, ακολούθησε η εξαγωγή των ζητούμενων πιθανοτήτων. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την απλή περίπτωση, δηλαδή νευρωνικό δίκτυο στο οποίο δεν υπάρχει προσαρμογή ρυθμού μάθησης, αλλά και με τις τιμές που εξήχθησαν από το Simulink για να φανεί η διαφορά, αλλά και η χρησιμότητα του συστήματος που κατασκευάσαμε [2,10].

Το απλό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην κατηγορία των νευρωνικών δικτύων προσοτροφοδότησης (feedforward), τα οποία αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 7.2.2. Αποτελείται από ένα κρυμμένο επίπεδο με επτά νευρώνες, ενώ η συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων είναι η σιγμοειδής. Το κομμάτι της εκπαίδευσής του εκτελείται σε 300 εποχές.

Το νευρωνικό δίκτυο με χρήση ενισχυτικής μάθησης για την μεταβολή του ρυθμού μάθησης, το οποίο κατασκευάσαμε εμείς [2], είναι παρόμοιο με το απλό, αφού αποτελείται και αυτό από ένα κρυμμένο επίπεδο με επτά νευρώνες και η συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων είναι σιγμοειδής. Η κύρια διαφορά του με το απλό νευρωνικό δίκτυο είναι ότι η μάθησή του εκτελείται σε 20 εποχές, αριθμός σημαντικά μικρότερος από αυτόν των 300 εποχών. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ύπαρξη του υποσυστήματος για την μεταβολή του ρυθμού μάθησης. Η ύπαρξη της συνάρτησης Q μειώνει αισθητά τον αναγκαίο αριθμό εποχών για την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πιθανότητες που προέκυψαν από την προσομοίωση με το Simulink, οι πιθανότητες σφάλματος που εξήχθησαν από το απλό νευρωνικό δίκτυο και το νευρωνικό δίκτυο με ενισχυτική μάθηση, καθώς και τα σφάλματα μεταξύ τους:

| R (Ω) | Ενέργεια αλεξικέραунου (KJ) | Βήμα τοποθέτησης αλεξικέραунου ανά x πυλώνα | Πιθανότητα σφάλματος αλεξικέραунου από Simulink | Πιθανότητα σφάλματος από απλό νευρωνικό δίκτυο | Πιθανότητα σφάλματος από νευρωνικό δίκτυο με ενισχυτική μάθηση | Σφάλμα απλού νευρωνικού δικτύου | Σφάλμα νευρωνικού δικτύου με ενισχυτική μάθηση |
|-------------------|-----------------------------|---|---|--|--|---------------------------------|--|
| 32 | 400 | 0 | 3,00% | 2,97% | 2,81% | 1,000% | 6,333% |
| 57 | 400 | 2 | 4,90% | 4,93% | 4,93% | 0,612% | 0,612% |
| 71 | 700 | 1 | 0,55% | 0,48% | 0,54% | 12,727% | 1,818% |
| 92 | 400 | 2 | 6,00% | 6,02% | 5,99% | 0,333% | 0,167% |
| 106 | 700 | 0 | 0,73% | 0,69% | 0,71% | 5,479% | 2,740% |
| 48 | 700 | 2 | 0,53% | 0,64% | 0,59% | 21,905% | 12,381% |
| 17 | 400 | 1 | 3,20% | 3,02% | 3,00% | 5,625% | 6,250% |
| 28 | 370 | 0 | 2,70% | 3,02% | 2,83% | 11,852% | 4,815% |
| 123 | 700 | 1 | 0,96% | 1,01% | 0,97% | 5,208% | 1,042% |
| 87 | 720 | 0 | 0,57% | 0,57% | 0,64% | 0,000% | 12,281% |
| Μέσος όρος | | | | | | 6,474% | 4,844% |

Στην πρώτη στήλη φαίνονται οι διάφορες τιμές της αντίστασης γείωσης για τις οποίες έγιναν οι δοκιμές, ενώ στην δεύτερη φαίνεται η μέγιστη ενέργεια αντοχής του αλεξικέραунου. Στην συνέχεια, ακολουθεί το βήμα τοποθέτησης των αλεξικέραунων. Το νούμερο μηδέν αντιστοιχεί στην τοποθέτηση αλεξικέραунων σε κάθε πυλώνα, το νούμερο ένα στην τοποθέτηση αλεξικέραунων ανά ένα πυλώνα και τέλος το νούμερο δύο στην τοποθέτηση αλεξικέραунων ανά δύο πυλώνες. Οι επόμενες τρεις στήλες περιέχουν τις μετρούμενες πιθανότητες σφάλματος των αλεξικέραунων με την χρήση του Simulink (από το Κεφάλαιο 5), του απλού νευρωνικού δικτύου χωρίς την ενίσχυση μάθησης και του νευρωνικού δικτύου με την ενισχυτική μάθηση αντίστοιχα. Τέλος, στις δύο τελευταίες στήλες παρουσιάζονται οι απόλυτες τιμές των σφαλμάτων των μετρούμενων πιθανοτήτων των δύο νευρωνικών ως προς τις τιμές που εξήχθησαν από το Simulink και οι αντίστοιχοι μέσοι όροι τους.

7.5.Η επόμενη μέρα

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι και τα δύο νευρωνικά δίκτυα που δοκιμάστηκαν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς τα σφάλματα σε σχέση με τις τιμές του Simulink είναι μικρά, όχι όμως τόσο καλά όσο αναμένεται να δουλεύει ένα νευρωνικό δίκτυο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι τα δείγματα με τα οποία έγινε η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου δεν ήταν αρκετά, ώστε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

Μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων εισόδου με πιο πυκνά βήμα στην ενέργεια του αλεξικέραυνου θα δώσει αποτελέσματα με μικρότερο σφάλμα. Τέλος, ιδανικότερη εκπαίδευση θα αποτελούσε η χρήση πραγματικών δεδομένων αν αυτά είναι διαθέσιμα.

7.6.Βιβλιογραφία

- [1] Σπύρος Γ. Τζαφέστας, «Υπολογιστική Νοημοσύνη», Τόμος Α:Μεθοδολογίες, Αθήνα 2002
- [2] Γεράσιμος Ε. Σπανάκης, «Δημιουργία υποσυστήματος εκμάθησης των ρυθμιστικών παραμέτρων ενός νευρωνικού δικτύου με χρήση ενισχυτικής μάθησης», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006
- [3] Ι. Βλαχάβας, Π. Κεφάλας, Ν. Βασιλειάδης, Φ. Κόκκορας, Η. Σακελλαρίου, «Τεχνητή Νοημοσύνη», Β' Έκδοση, 2005
- [4] S. Haykin, "Neural Networks – A Comprehensive Foundation", Prentice – Hall, 1999
- [5] C. J. C. H. Watkins and P. Dayan, "Machine Learning", 8, 279-292
- [6] N. J. Nilsson, "Introduction to Machine Learning", 1996
- [7] T. Mitchell, "Machine Learning", McGraw – Hill, 1997
- [8] Mr. Herrmann, R. Der, "Efficient Q-learning by division of labor", 1998
- [9] R. S. Sutton, A. G. Barto, "Reinforcement Learning: An introduction", The MIT Press, 2005
- [10] L. Kaelbling, M. L. Littman, A. W. Moore, "Reinforcement Learning: A survey, Journal of Artificial Intelligence, Research 4, pp 237-285, 1996

Κεφάλαιο 8

Μελέτη ανάστροφης αγωγής αλεξικέραυνων –

Εφαρμογή σε αιολικό πάρκο

8.1.Αιολική ενέργεια - Ανεμογεννήτριες

8.1.1.Εισαγωγή – Γενικά για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανικής μας εποχής οδήγησαν τον άνθρωπο στην αλόγιστη και σπάταλη εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων. Η συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την έντονη ανομοιομορφία της ενεργειακής ζήτησης στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, εγγυώνται τη διατήρηση υψηλών ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας και κατά τα επόμενα χρόνια [1].

Η μόνη απάντηση στην εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στη διαρκή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Φυσικά, οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι δυνατόν να επιλύσουν το συνολικό ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας, τουλάχιστον με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα. Εάν όμως η αξιοποίησή τους συνδεθεί με την προσπάθεια εξοικονόμησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και με την ορθολογική διαχείριση των υφιστάμενων ενεργειακών πόρων, είναι δυνατή η σταδιακή απομάκρυνση του εφιάλτη της ανθρωπότητας, δηλαδή του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα.

Οι *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)* είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη

κλίμακα. Ως ανανεώσιμες πηγές θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα).

8.1.2.Γενικά για την αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους.

Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα οι ανεμόμυλοι στη ξηρά.



(α)

(β)

Σχήμα 8.1: (α)Ιστιοφόρο, (β)Ανεμόμυλος

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Αν υπήρχε η δυνατότητα, με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Η αιολική ενέργεια προσφέρει πολλά *πλεονεκτήματα*, πράγμα που εξηγεί γιατί είναι η περισσότερο *ταχέως αναπτυσσόμενη* πηγή ενέργειας στον κόσμο.

- Είναι πολύ φιλική προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα. Η αιολική ενέργεια δεν μολύνει την ατμόσφαιρα όπως τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού, τα οποία στηρίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων, όπως άνθρακα ή φυσικό αέριο. Οι ανεμογεννήτριες δεν εκλύουν χημικές ουσίες στο περιβάλλον οι οποίες προκαλούν όξινη βροχή ή αέρια του θερμοκηπίου.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθεί ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορεί να βοηθήσει την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσει την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτη εφαρμογή που μπορεί να παράγει ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
- Εγκαταστάσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική επιδοτείται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός *μειονεκτημάτων* που πρέπει, επίσης, να αναφερθεί.

- Η αιολική ενέργεια πρέπει να συναγωνιστεί τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε επίπεδο κόστους. Ανάλογα με το πόσο ενεργητική, ως προς τον άνεμο, είναι μια τοποθεσία, το αιολικό πάρκο μπορεί ή δεν μπορεί να είναι ανταγωνιστικό ως προς το κόστος. Παρότι το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί δραματικά τα τελευταία 10 χρόνια, η τεχνολογία απαιτεί μια αρχική επένδυση υψηλότερη από εκείνη των γεννητριών που λειτουργούν με καύση ορυκτών.
- Η ισχυρότερη πρόκληση στη χρησιμοποίηση του ανέμου ως πηγή ενέργειας είναι ότι ο άνεμος είναι περιοδικά διακοπτόμενος και δεν φυσά πάντα όταν ο ηλεκτρισμός απαιτείται. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί (εκτός αν χρησιμοποιηθούν μπαταρίες). Επιπλέον, δεν μπορούν όλοι οι άνεμοι να τιθασευτούν ώστε να καλυφθούν, τη στιγμή που προκύπτουν, οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό.

- Τα κατάλληλα σημεία για αιολικά πάρκα συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από πόλεις όπου χρειάζεται ο ηλεκτρισμός.
- Η ανάπτυξη της εκμετάλλευσης του ανέμου ως φυσικού πόρου μπορεί ίσως να συναγωνιστεί άλλες χρήσεις της γης και αυτές οι εναλλακτικές χρήσεις ίσως χαίρουν μεγαλύτερης εκτιμήσεως από ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Αν και τα αιολικά πάρκα έχουν σχετικά μικρή επίπτωση στο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπάρχει ένας προβληματισμός για τον θόρυβο που παράγεται από τις λεπίδες του ηλεκτρικού κινητήρα (ρότορα), για την αισθητική (οπτική) επίπτωση και για τα πουλιά που μερικές φορές έχουν σκοτωθεί, καθώς πετούσαν προς τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

8.2.Είδη ανεμογεννητριών

Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου και την επιφάνεια το εδάφους [2]:

• *Οριζοντίου άξονα*, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα διαχωρίζονται με βάση τον αριθμό των πτερυγίων σε πολύπτερους και ολιγόπτερους.

Οι δρομείς των πολύπτερων ανεμοκινητήρων έχουν μικρή διάμετρο, μικρή περιφερειακή ταχύτητα και μεγάλη ροπή. Λόγω του μεγάλου πλήθους πτερυγίων (4 και άνω) παρουσιάζουν μεγάλη στιβαρότητα με μικρή ταχύτητα ακροπτερυγίου λ . Σε σύγκριση με τους ολιγόπτερους παρουσιάζουν μικρότερο συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p και μικρότερη ταχύτητα ακροπτερυγίου λ . Εκ κατασκευής η διάμετρος πρέπει να είναι μικρή, συνεπώς δεν επιδέχεται βελτίωση ο συντελεστής ισχύος του. Στην Αμερική ανεμόμυλοι με αυτού του τύπου δρομέα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για άντληση νερού.

Σε ολιγόπτερες ανεμογεννήτριες, οι δρομείς έχουν το πολύ μέχρι τρία πτερύγια. Συνήθως δύο ή τρία, αν και υπάρχουν και μονόπτεροι δρομείς. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ο μεγάλος συντελεστής ισχύος και η βέλτιστη λειτουργία του σε μεγάλο σχετικά λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ . Οι νεότεροι δρομείς έχουν λεπτά πτερύγια σε αντίθεση με παλιότερους που είχαν πλατιά. Οι αεροτομές τους είναι τέτοιες, ώστε να παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή άνωσης σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης και ταυτόχρονα διατηρούν μικρό συντελεστή αντίστασης σε ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης. Οι ρότορες αυτοί

περιστρέφονται γρήγορα (ταχύστροφοι) και η εγκατάστασή τους είναι πιο εύκολη σε σχέση με τους προηγούμενους.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να παρατηρηθεί ότι ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% πιο αποδοτικός από το δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα. Παρόλα αυτά είναι ακριβότερος, αφού υπάρχει άλλο ένα πτερύγιο. Ο μονόπτερος είναι φθηνός, αφού έχει ένα μόνο πτερύγιο, παρουσιάζει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από το δίπτερο, περισσότερο θόρυβο και η ζυγοστάθμισή του παρουσιάζει προβλήματα.



(α)



(β)

Σχήμα 8.2: (α) Δίπτερο ανεμογεννήτρια, (β) Τρίπτερο ανεμογεννήτρια

▮ *Κατακόρυφου άξονα*, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν εκ κατασκευής μεγάλη στιβαρότητα, διότι περιστρέφονται με χαμηλές στροφές (αργόστροφες), επομένως εμφανίζουν χαμηλό συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p και ταχύτητα ακροπτερυγίου λ . Είναι απλοί και φθηνοί στην κατασκευή. Δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση και όταν αυτό χρειαστεί γίνεται εύκολα αφού όλα τα υποσυστήματα (κιβώτιο ταχυτήτων, σύστημα πέδησης, γεννήτρια) βρίσκονται στο έδαφος, οπότε υπάρχει άμεση εποπτεία και είναι εύκολη η διάγνωση πιθανών βλαβών, πράγμα σπάνιο. Λόγω του ότι είναι στιβαροί σημαίνει ότι είναι περισσότερο ανθεκτικοί σε δυναμικά φαινόμενα, όπως σεισμοί, σφοδρές ταχύτητες ανέμου και λοιπά. Το γεγονός ότι ο άξονας είναι κατακόρυφος τους καθιστά ανεξάρτητους από τη διεύθυνση ροής του αέρα συνεπώς δεν απαιτούν σύστημα προσανατολισμού. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών καθίστανται κατάλληλοι για αγροτικές εφαρμογές όπως άντληση νερού κ.τ.λ.



Σχήμα 8.3: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό 90 %. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 kW και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας.

Ενδιαφέρον, για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού τους, έχουν οι περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Ένα πάρκο ανεμογεννητριών, το οποίο σε ταχύτητα 8m/sec αποδίδει 1600KW, σε ταχύτητα 4m/sec αποδίδει μόνο 200 KW. Σημαντικό ρόλο παίζει, επίσης, ο τόπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Η ύπαρξη ανωμαλιών του εδάφους, κτιρίων, δέντρων ή εμποδίων γενικά μπορεί να δημιουργήσει στροβιλισμούς και να μειώσει την αποδοτικότητα. Πριν την επιλογή της περιοχής απαιτείται μελέτη στατιστικών μετεωρολογικών δεδομένων για τις κατευθύνσεις των κυρίαρχων ανέμων για περίοδο ενός χρόνου.

8.3.Κατασκευαστική διαμόρφωση μιας ανεμογεννήτριας

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη :

1. Τον πύργο.
2. Τον θάλαμο που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα (κύριος άξονα, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων και ηλεκτρογεννήτρια).

3. Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας. Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα μικροελεγκτών και «φροντίζουν» για την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε όλες τις συνθήκες.
4. Τα περύγια είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά (υαλονήματα και ειδικές ρητίνες), παρόμοια με αυτά που κατασκευάζονται τα ιστιοπλοϊκά σκάφη. Είναι δε σχεδιασμένα για να αντέχουν σε μεγάλες καταπονήσεις.

Ως απαραίτητο εξάρτημα λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας σε αιολικό πάρκο, θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε και τον μετασχηματιστή μετατροπής της χαμηλής τάσης της ανεμογεννήτριας σε μέση τάση προκειμένου να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο της ΔΕΗ. Ο μετασχηματιστής είναι συνήθως εγκατεστημένος δίπλα στην ανεμογεννήτρια και δεν διαφέρει κατασκευαστικά από τους μετασχηματιστές που είναι εγκατεστημένοι πάνω στους στύλους της ΔΕΗ και μάλιστα συνήθως λίγα μέτρα από τα σπίτια μας.

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω:



Σχήμα 8.4: Τα κατασκευαστικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας

1. Πτερύγια (Blades)
2. Ηλεκτρικός κινητήρας / Ρότορας (Rotor)
3. Κλίση πτερυγίων (Pitch)
4. Φρένο (Brake)
5. Άξονας χαμηλών ταχυτήτων (Low-speed shaft)
6. Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box)
7. Γεννήτρια (Generator)
8. Ελεγκτής (Controller)
9. Ανεμόμετρο (Anemometer)
10. Ανεμοδείκτης (Wind vane)
11. Θάλαμος (Nacelle)
12. Άξονας υψηλών ταχυτήτων (High-speed shaft)
13. Οδηγός για την αποφυγή εκτροπής (Yaw drive)
14. Κινητήρας του οδηγού για την αποφυγή εκτροπής (Yaw motor)
15. Πύργος (Tower)

8.4.Η υπάρχουσα κατάσταση

Όλες σχεδόν οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης διαθέτουν αιολικά πάρκα και παράγουν με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Η Δανία είναι η πρωτοπόρος χώρα από άποψη τεχνολογίας. Η Γερμανία και η Ισπανία, όμως, (λόγω έκτασης) διαθέτουν την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ [3].

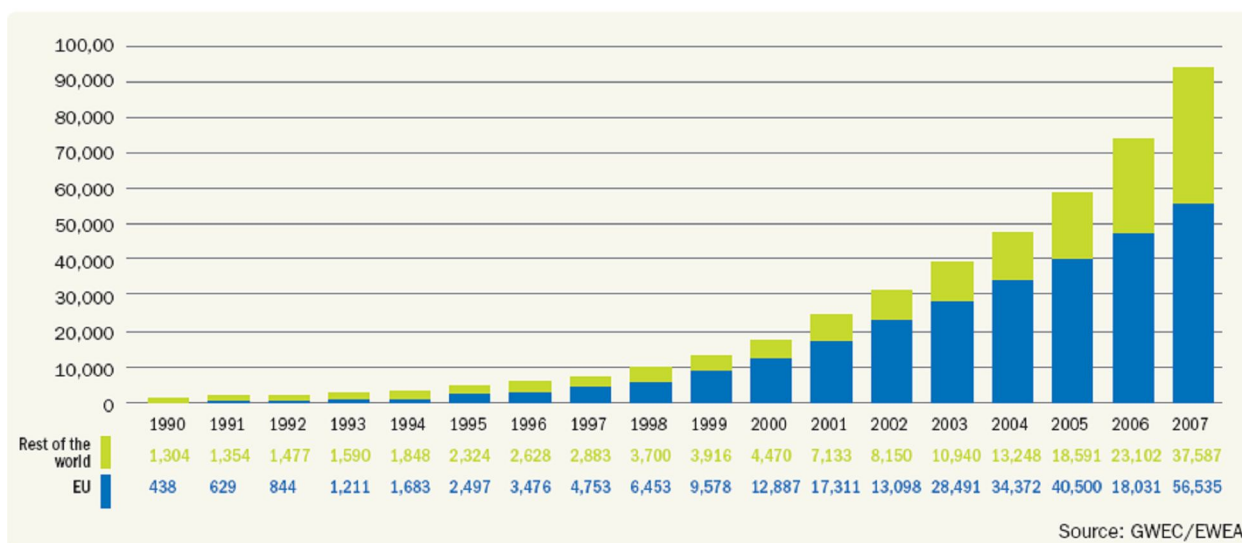


Σχήμα 8.5: Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη στα τέλη του 2007

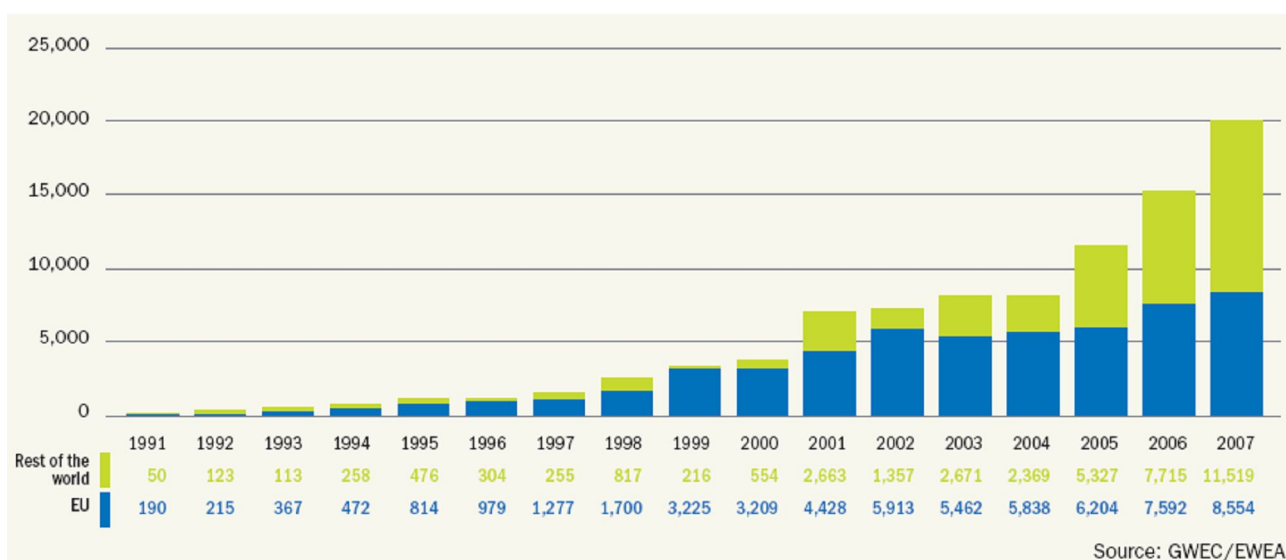
Ο στόχος που είχε θέσει η EWEA (Ευρωπαϊκή Οργάνωση Αιολικής Ενέργειας) είναι η αιολική ενέργεια να καλύπτει το 12% των ενεργειακών αναγκών της Ε.Ε. μέχρι το 2020. Με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία αυτό είναι εφικτό.

Στο Σχήμα 8.6 δίνεται η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, αλλά και η εγκατεστημένη ισχύς στην Ε.Ε. και στο Σχήμα 8.7 φαίνεται η ισχύς που εγκαθίσταται ετησίως από το 1990 ως το 2007.

Είναι φανερό ότι η Ε.Ε. κατέχει παραπάνω από το 60% της συνολικής εγκατεστημένης παγκόσμιας ισχύος. Το υπόλοιπο 40% βασικά ανήκει στις Η.Π.Α., αλλά και σε άλλες περιοχές του κόσμου, όπως Κίνα και Ιαπωνία.



Σχήμα 8.6: Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, αλλά και η εγκατεστημένη ισχύς στην Ε.Ε.



Σχήμα 8.7: Η ετήσια παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, αλλά και η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς στην Ε.Ε.

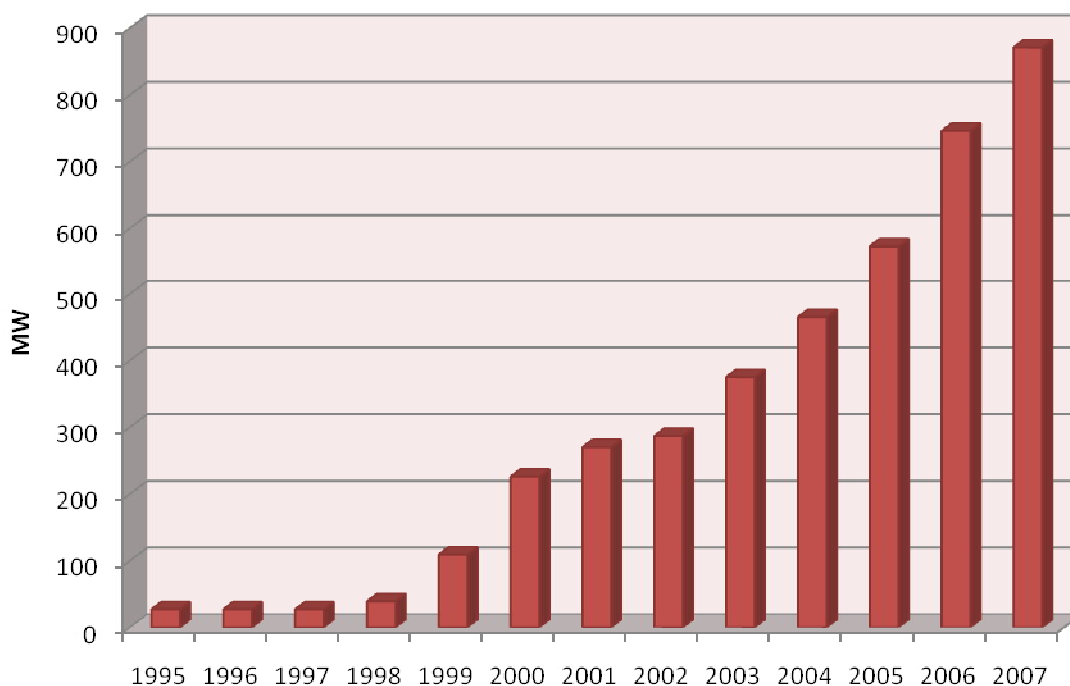
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα.

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν κατασκευασθεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Σάμο και στην Κρήτη εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο συνολικής ισχύος πάνω από 30 MW. Μεγάλο ενδιαφέρον, επίσης, δείχνει και ο ιδιωτικός τομέας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Κρήτη, όπου το Υπουργείο Ανάπτυξης έχει εκδώσει άδειες εγκατάστασης για νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος δεκάδων MW.

Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13.6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις «ήπιες μορφές ενέργειας». Αλλά και σε εθνική κλίμακα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος 3299/04, σε συνδυασμό με το νόμο για της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 3468/06, παρέχει ισχυρότητα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας. Η περιφέρεια της Δυτικής Ελλάδας, αν και έχει μικρότερο αιολικό δυναμικό σε σύγκριση με άλλες περιοχές, διαθέτει ένα ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανεμωδών «νησίδων» (λόφοι, υψώματα κλπ. με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό) την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.

Στο Σχήμα 8.8 φαίνεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος για εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα από το 1995 ως και τα τέλη του 2007.

Η εξέλιξη των αιολικών στην Ελλάδα



Σχήμα 8.8: Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ανεμογεννητριών στον ελλαδικό χώρο.

Πιο συγκεκριμένα, για το 2007 παρατίθενται τα παρακάτω στοιχεία, όπως δημοσιεύθηκαν από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (Σχήμα 8.9):

| ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ | ΙΣΧΥΣ (MW) | Αριθμ. Α/Γ | % |
|---------------------------|---------------|-------------|-------------|
| ΑΝ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ | 214,55 | 187 | 24,6% |
| ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ (& ΕΥΒΟΙΑ) | 251,85 | 368 | 28,9% |
| ΚΡΗΤΗ | 129,15 | 213 | 14,8% |
| ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ | 142,85 | 86 | 16,4% |
| Ν. ΑΙΓΑΙΟ | 38,59 | 73 | 4,4% |
| Β. ΑΙΓΑΙΟ | 30,20 | 116 | 3,5% |
| ΘΕΣΣΑΛΙΑ | 17,00 | 20 | 2,0% |
| ΙΟΝΙΟ | 43,60 | 27 | 5,0% |
| ΑΤΤΙΚΗ | 3,12 | 6 | 0,4% |
| ΣΥΝΟΛΟ | 870,91 | 1096 | 100% |

Σχήμα 8.9: Η αιολική ισχύς και ο αριθμός ανεμογεννητριών κατανομημένες στον ελλαδικό χώρο για το έτος 2007.

8.5.Αιολικά πάρκα

Αιολικό πάρκο ονομάζουμε μια περιοχή, όπου έχουν εγκατασταθεί πολλές ανεμογεννήτριες.



Για την αποδοτική εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σ' ένα αιολικό πάρκο είναι απαραίτητη η τήρηση ορισμένων κανόνων ως προς τις μεταξύ των πύργων αποστάσεις. Οι αποστάσεις εξαρτώνται από το ανάγλυφο του εδάφους, την κατεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου και το μέγεθος της φτερωτής. Οι βέλτιστες αποστάσεις κατά τη διεύθυνση του ανέμου κυμαίνονται μεταξύ 8 και 12 φορές τη διάμετρο της φτερωτής, ενώ κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου οι αποστάσεις κυμαίνονται μεταξύ 1,5 και 3 φορές τη διάμετρο της φτερωτής. Για παράδειγμα, ένα αιολικό πάρκο που περιλαμβάνει 20 πύργους ισχύος 500 kW ο καθένας, αναπτύσσεται σε επιφάνεια 1-2 km², από την οποία ένα πολύ μικρό ποσοστό (περίπου 5%) είναι απαραίτητο για την εγκατάσταση των πύργων και για τους δρόμους προσπέλασης σ' αυτούς. Η υπόλοιπη έκταση μπορεί να χρησιμοποιείται με διαφορετικό τρόπο (αγροτική καλλιέργεια, κτηνοτροφία, αναψυχή, φυσικό απόθεμα κτλ.). Ο αριθμός των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου κυμαίνεται από λίγες μέχρι εκατοντάδες, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ. Αν η επιφάνεια εγκατάστασης είναι περιορισμένη ή το κόστος της γης σημαντικό, μια μελέτη βελτιστοποίησης της απόδοσης είναι απαραίτητη.

Οι ανεμογεννήτριες θεωρούνται γενικά μηχανές χαμηλής στάθμης θορύβου. Ο θόρυβος που παράγεται δεν είναι ιδιαίτερα αισθητός στην περιοχή. Ο θόρυβος από μια τυπική μονάδα ισχύος 600 kW ανέρχεται σε 55 dBA σε απόσταση 50 m από την πηγή, ενώ

ελαττώνεται στα 40 dBA σε απόσταση 250 m. Η επίδραση σε άλλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (τηλεπικοινωνίες, ραδιόφωνο, τηλεόραση κτλ.) του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται σ' ένα αιολικό πάρκο κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί με γενικό ή προσεγγιστικό τρόπο. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται εξειδικευμένη έρευνα και μελέτη. Η περιβαλλοντική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών μπορεί να χαρακτηριστεί γενικά θετική. Κατά τη λειτουργία τους δεν προκαλείται άμεση ρύπανση της ατμόσφαιρας. Η έμμεση ρύπανση από την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή, τη μεταφορά, την εγκατάσταση και την αποκομιδή τους εξαρτάται από τον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Ποσοτικά, η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή, μεταφορά εγκατάσταση και αποκομιδή μιας τυπικής ανεμογεννήτριας αποδίδεται περίπου σε έξι μήνες λειτουργίας της. Η αλλοίωση της αισθητικής του τοπίου δεν είναι δυνατό να παραβλεφθεί. Αποτελεί θέμα ευρύτερου σχεδιασμού και χωροθέτησης του αιολικού πάρκου, στον οποίο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι κινούμενες σκιές που προκύπτουν από τη λειτουργία της φτερωτής. Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων σε καθιερωμένες διαδρομές πουλιών είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα στη μετακίνηση των σμηνών, χωρίς να αποκλείεται μείωση του πληθυσμού τους.

8.5.1.Σχεδιασμός αιολικών πάρκων

Για έναν ολοκληρωμένο σχεδιασμό ενός Αιολικού Πάρκου στο σύνολό του χρειάζονται τα ακόλουθα:

- **Επιλογή θέσεων μηχανών:** Αποτελεί τον ουσιαστικότερο παράγοντα στον επιτυχημένο σχεδιασμό ενός πάρκου, διότι από την επιτυχία της φάσεως αυτής εξαρτάται τόσο το συνολικό κόστος της επένδυσης, όσο και η επιτυχημένη και αποδοτική λειτουργία της στην συνέχεια. Σκοπός της φάσης αυτής, είναι ουσιαστικά να πετύχει την μέγιστη βελτιστοποίηση των αποδόσεων του Πάρκου. Για τον λόγο αυτό γίνεται συνεκτίμηση των παρακάτω παραγόντων:
 - a. **Ανεμολογικά δεδομένα:** Αποτελούν την βάση σχεδιασμού του πάρκου. Τα ανεμολογικά δεδομένα συγκεντρώνονται, είτε από τον κύριο του έργου, είτε από την εταιρεία που αναλαμβάνει το έργο, πάντοτε με την τοποθέτηση ιστών και μετρητικών διατάξεων και πρέπει να είναι αξιόπιστα. Σε περίπτωση που υπάρχουν ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής, τότε το μοντέλο απόδοσης του πάρκου θα προσεγγίσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα πραγματικά αποτελέσματα που θα προκύψουν.

- b. **Ανάγλυφο της περιοχής:** Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στον όλο σχεδιασμό του πάρκου. Σύνθετα πεδία με λόφους και βουνά απαιτούν διαφορετική προσέγγιση και αντιμετώπιση από επίπεδα πεδία ή από πεδία που βρίσκονται σε νησιά.
 - c. **Τοπογραφία της περιοχής:** Η τοπογραφία της περιοχής συνεκτιμάται σε μεγάλο βαθμό, διότι καθορίζει τον τρόπο προσπέλασης του πάρκου, τον σχεδιασμό της οδοποιίας και των πλατειών, καθώς και την χάραξη των οδεύσεων των δικτύων μέσης και υψηλής τάσης. Είναι πολύ βασικό για την όλη οικονομία της λύσης που θα επιλεγεί, τα παραπάνω έργα να σχεδιαστούν με τον οικονομικότερο δυνατόν τρόπο.
 - d. **Γεωλογία της περιοχής:** Εξετάζεται γεωλογικά η περιοχή, διότι η σύσταση του εδάφους και του υπεδάφους, καθώς και η σεισμικότητα της περιοχής επηρεάζουν σημαντικά την λύση που θα υιοθετηθεί. Πολλές φορές, ακατάλληλα εδάφη ή περιοχές με έγκοιλα ή καρστικά αποτρέπουν την τοποθέτηση μηχανών.
 - e. **Δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης της περιοχής:** Εξετάζονται οι θέσεις των δικτύων μεταφοράς ενέργειας της περιοχής, διότι αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στον σχεδιασμό του έργου. Από τις θέσεις τους καθορίζονται οι τεχνικές λύσεις που θα επιλεγούν, ενώ η εγγύτητα σε δίκτυα μειώνει το κόστος της επένδυσης.
- **Επιλογή τύπων μηχανών:** Μετά την συνεκτίμηση όλων των προηγούμενων παραγόντων και την επεξεργασία των αντιστοίχων στοιχείων, γίνεται η επιλογή του τύπου της μηχανής και του ύψους του πύργου. Το βήμα αυτό απαιτεί πολύ μεγάλη εμπειρία, διότι πρέπει να γίνει η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, να συνεκτιμηθεί το profile του ανέμου, το ανάγλυφο του πεδίου, οι τοπικές συνθήκες (πάγος, ισχυροί άνεμοι, κλπ), η προσπελασιμότητα, η συντήρηση, η αξιοπιστία της μηχανής, κλπ.

8.5.2.Μελέτες για την τοποθέτηση αιολικών πάρκων

Οι μελέτες ενός Αιολικού Πάρκου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις Ανεμολογικές Μελέτες και τις Μελέτες των Έργων Κατασκευής, οι οποίες με την σειρά τους διακρίνονται σε Μελέτες Έργων Πολιτικού Μηχανικού και Ηλεκτρομηχανολογικές Μελέτες.

- **Ανεμολογικές Μελέτες:** Αποτελούν την βάση σχεδιασμού ενός Αιολικού Πάρκου. Οι μελέτες πρέπει να στηρίζονται σε πραγματικά στοιχεία, μετρημένα στον τόπο του έργου με ακρίβεια και πιστότητα και με κάποιο χρονικό εύρος.
 - a. **Αξιολόγηση Μετρήσεων & Extreme Validation:** Είναι η πρώτη μελέτη που γίνεται και η οποία επεξεργάζεται τις μετρήσεις πεδίου, τις αξιολογεί, τις απαλλάσσει από τα αναξιόπιστα στοιχεία και ετοιμάζει το αρχείο για την δημιουργία του ανεμολογικού μοντέλου του πεδίου.
 - b. **Correlation:** Στην περίπτωση που υπάρχουν έγκυρα ιστορικά στοιχεία μετρήσεων στην κοντινή περιοχή, με την βοήθεια τους γίνεται διόρθωση και προβολή των στοιχείων πεδίου σε βάθος χρόνου. Αυτό εξασφαλίζει ακριβέστερη προσέγγιση του αναμενόμενου αιολικού δυναμικού, διότι κάθε ανεμολογική χρονιά είναι διαφορετική από την προηγούμενή της έως και 30% ορισμένες φορές, ενώ ένας πλήρης ανεμολογικός κύκλος υπολογίζεται στα 5 έως 6 χρόνια.
 - c. **Ενεργειακή Παραγωγή:** Επεξεργάζεται τα στοιχεία που προέκυψαν από τις προηγούμενες μελέτες και υπολογίζει την παραγόμενη ενέργεια με πιθανότητες από P50 μέχρι P95. Η ενεργειακή παραγωγή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, την θέση, το ύψος, την πυκνότητα της αέριας μάζας, κλπ.
 - d. **Micrositing:** Είναι μια μελέτη, η οποία βελτιστοποιεί μέχρι και 10% πολλές φορές την ενεργειακή απόδοση ενός πεδίου, κάνοντας μικρομετακινήσεις των θέσεων των μηχανών, βελτιώνοντας θέματα σκιάσεων και τυρβοειδούς ροής, μικρομεταβολές ύψους μηχανής, κλπ.
- **Μελέτες Έργων Κατασκευής:** Είναι το σύνολο των μελετών που απαιτούνται για την ορθή, άρτια τεχνικά, έγκαιρη και οικονομική εκτέλεση των κατασκευαστικών έργων του project. Εκτός των άλλων δίνουν την δυνατότητα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και την προϋπολογιστική μείωση του κόστους του project πριν την φάση της κατασκευής. Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - a. **Μελέτες Έργων Πολιτικού Μηχανικού:** Περιλαμβάνονται όλες οι μελέτες, οι οποίες έχουν να κάνουν με έργα αρμοδιότητας Πολιτικού Μηχανικού και είναι:
 - i. **Γενικό Layout:** Περιλαμβάνει την πλήρη ανάπτυξη του Πάρκου με τις θέσεις των μηχανών, τις προσβάσεις, την οδοποιία και τα τεχνικά έργα

- ii. **Γεωτεχνική Μελέτη:** Η μελέτη εκπονείται σε δύο στάδια. Το πρώτο είναι μακροσκοπικό και εκπονείται κατά την διάρκεια του γενικού σχεδιασμού του έργου και σκοπό έχει τον προσδιορισμό των βασικών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του πεδίου, καθώς και την σεισμική ζώνη στην οποία ανήκει. Το δεύτερο στάδιο εκπονείται κατά την διάρκεια των εκσκαφών. Η έρευνα είναι ακριβής και γίνεται με την βοήθεια γεωτρύπανου. Έτσι, προσδιορίζεται με ακρίβεια η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης, ενώ αποφεύγονται τα έγκοιλα και τα καρστικά.
 - iii. **Μελέτη Οδοποιίας:** Συντάσσεται μελέτη οδοποιίας, η οποία δημιουργεί την βέλτιστη χάραξη, λαμβάνει υπόψη της όλα τα βασικά μεγέθη και διαστάσεις για την κίνηση των φορτηγών, των γερανών και των μηχανημάτων, τα οποία θα κινηθούν μέσα στο πεδίο, λαμβάνει υπόψη της τις μέγιστες επιτρεπόμενες κλίσεις και βελτιστοποιεί τους χωματισμούς με αποτέλεσμα την οικονομία στην κατασκευή. Αντιμετωπίζει θέματα απορροών, τεχνικών έργων και προσβάσεων, έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα και εκπλήξεις κατά την διάρκεια της κατασκευής. Η μελέτη περιλαμβάνει οριζοντιογραφία, μηκοτομές, διατομές, διαγράμματα επικλίσεων και πίνακα χωματισμών.
 - iv. **Μελέτη Πλατειών:** Συντάσσεται μελέτη εκσκαφής και διάταξης της κάθε πλατείας χωριστά, η οποία λαμβάνει υπόψη της όλα τα βασικά μεγέθη και διαστάσεις για την κίνηση των φορτηγών, των γερανών και των μηχανημάτων, τα οποία θα κινηθούν στο χώρο της πλατείας και βελτιστοποιεί τους χωματισμούς με αποτέλεσμα την οικονομία στην κατασκευή. Αντιμετωπίζει θέματα διάταξης και αποθήκευσης υλικών, ανέγερσης, montage και προσβάσεων, έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κατά την διάρκεια της ανέγερσης.
 - v. **Στατική Μελέτη:** Με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας και τα φορτία του κατασκευαστή των μηχανών, συντάσσεται στατική μελέτη εφαρμογής της θεμελίωσης του πυλώνα.
- b. **Μελέτες Έργων Ηλεκτρολόγου Μηχανικού:** Περιλαμβάνονται όλες οι μελέτες, οι οποίες έχουν να κάνουν με έργα αρμοδιότητας Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και είναι:

- i. **Γενικό Layout:** Περιλαμβάνει την πλήρη ανάπτυξη του Πάρκου με τις θέσεις των μηχανών, τις προσβάσεις, την οδοποιία, τις οδεύσεις των δικτύων μέσης και υψηλής τάσης, τις θέσεις των οικίσκων ελέγχου και του υποσταθμού όπου υπάρχει.
- ii. **Μελέτες γειώσεων:** Περιλαμβάνονται οι μελέτες γειώσεων των ανεμογεννητριών, των υπογείων καλωδίων μέσης τάσης και του υποσταθμού.
- iii. **Μελέτη εσωτερικού δικτύου μέσης τάσης 20kV:** Περιλαμβάνει την μελέτη του εσωτερικού υπόγειου δικτύου μέσης τάσης του Πάρκου. Καθορίζει βάθη εκσκαφής, διατομές καλωδίων, τρόπους σήμανσης, θέσεις και εξοπλισμό οικίσκων ελέγχου.
- iv. **Μελέτη εξωτερικού δικτύου μέσης τάσης 20kV:** Περιλαμβάνει την μελέτη του εξωτερικού, εναερίου συνήθως, δικτύου μέσης τάσης, το οποίο συνδέει το Πάρκο με τον υποσταθμό ή το δίκτυο μέσης τάσης. Γίνεται η χάραξη της διαδρομής με πρόνοια για τους κύριους ανέμους για την αποφυγή συγκέντρωσης σκόνης στο δίκτυο, προδιαγράφονται τα υλικά και οι μονωτήρες, υπολογίζονται διατομές καλωδίων και οι απώλειες ενέργειας.
- v. **Μελέτη υποσταθμού μέσης - υψηλής τάσης 20kV/150kV:** Εκπονείται πλήρης μελέτη υποσταθμού, η οποία περιλαμβάνει την δημιουργία του γενικού layout του υποσταθμού, την διαμόρφωση του οικοπέδου, τις προσβάσεις, το κτίριο του υποσταθμού με όλο του τον εξοπλισμό, τον ή τους μετασχηματιστές, τα ικριώματα, τις γειώσεις, τον φωτισμό, τα αλεξικέραυνα προστασίας, τις θεμελιώσεις και τα υπόγεια κανάλια, καθώς και κάθε άλλο στοιχείο απαραίτητο για την πλήρη και έντεχνη κατασκευή του υποσταθμού.
- vi. **Μελέτη σύνδεσης στην υψηλή τάση 150kV:** Εκπονείται πλήρης μελέτη σύνδεσης του υποσταθμού με το πλησιέστερο δίκτυο υψηλής τάσης της περιοχής. Γίνεται η χάραξη της διαδρομής με πρόνοια για τους κύριους ανέμους για την αποφυγή συγκέντρωσης σκόνης στο δίκτυο, προδιαγράφονται τα υλικά και οι μονωτήρες, υπολογίζονται διατομές καλωδίων και οι πυλώνες.
- vii. **Μελέτη δικτύου επικοινωνιών:** Εκπονείται πλήρης μελέτη εσωτερικής διασύνδεσης των μηχανών του Πάρκου, των οικίσκων

ελέγχου και του υποσταθμού με οπτικές ίνες ή κάτοπτρα για την αναγκαία σύνδεση, παρακολούθηση και τηλεχειρισμό του Πάρκου από τον κύριο του έργου, τον ΔΕΣΜΗΕ και τον προμηθευτή των μηχανών.

8.5.3.Κατασκευές αιολικών πάρκων

Οι κατασκευές και οι εργασίες ενός Αιολικού Πάρκου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα Έργα Πολιτικού Μηχανικού και η δεύτερη τα Ηλεκτρομηχανολογικά Έργα.

1) Έργα Πολιτικού Μηχανικού: Είναι το σύνολο των έργων αρμοδιότητας Πολιτικού Μηχανικού, τα οποία αναφέρονται αναλυτικότερα παρακάτω:

- i. **Βελτίωση υφιστάμενης οδοποιίας:** Περιλαμβάνει τις απαραίτητες εργασίες για την βελτίωση υφιστάμενων τμημάτων οδοποιίας, τα οποία εξασφαλίζουν πρόσβαση στην περιοχή του έργου. Οι κυριότερες επεμβάσεις που γίνονται σε αυτά τα τμήματα είναι διαπλατύνσεις και ανοίγματα κλειστών στροφών, διαπλατύνσεις στενών τμημάτων, τεχνικά έργα για την αποφυγή ζημιών από την βροχή, βελτιώσεις κλίσεων και εξομάλυνση της επιφάνειάς τους.
- ii. **Έργα διαμόρφωσης πλατειών:** Περιλαμβάνει την εκσκαφή των πλατειών με μηχανικά μέσα, προώθηση ή φορτοεκφόρτωση, μεταφορά και απόρριψη στις προδιαγεγραμμένες διατομές των προϊόντων εκσκαφής, συμπύκνωση αυτών και δημιουργία τελικής επιφάνειας με θραυστό υλικό.
- iii. **Έργα θεμελίωσης ανεμογεννητριών:** Είναι από τα σημαντικότερα έργα Πολιτικού Μηχανικού, γιατί η θεμελίωση του πύργου της μηχανής καταπονείται δυναμικά καθ' όλη την διάρκεια της ζωής της. Περιλαμβάνει την εκσκαφή της θεμελίωσης, την εξομάλυνση του πυθμένα εκσκαφής με θραυστό υλικό, την διάνοιξη οπών για τα ηλεκτρόδια γείωσης, την κατασκευή της θεμελιακής γείωσης, την σκυροδέτηση beton καθαριότητας, την τοποθέτηση του δακτυλίου βάσης και των αγκυρίων ή του κατώτερου τμήματος του μεταλλικού πύργου, τον οπλισμό, το καλούπωμα με μεταλλότυπους και την σκυροδέτηση του θεμελίου. Τέλος, στην περίπτωση που έχουν τοποθετηθεί αγκύρια, το κενό μεταξύ θεμελίου και φλάντζας του πύργου πληρώνεται με μη συρρικνούμενο σκυρόδεμα, ενώ στην περίπτωση που έχει τοποθετηθεί το κατώτερο τμήμα του πύργου, τοποθετείται εξωτερική σφράγιση με ακρυλική μαστίχη.





2) Έργα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού: Περιλαμβάνονται όλα τα έργα αρμοδιότητας Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και τα οποία αναλυτικότερα είναι:

- i. **Κατασκευή εσωτερικού δικτύου μέσης τάσης 20kV:** Περιλαμβάνει την κατασκευή του εσωτερικού υπόγειου δικτύου μέσης τάσης του Πάρκου, δηλαδή την εκσκαφή χάνδακα με μηχανικά μέσα, την τοποθέτηση άμμου, καλωδίων και πλέγματος σήμανσης, επίχωση με υλικά εκσκαφής και συμπύκνωση. Περιλαμβάνει, επίσης, την κατασκευή των οικίσκων ελέγχου, καθώς και τον πλήρη εξοπλισμό τους με τα απαραίτητα όργανα και πίνακες.
- ii. **Κατασκευή εξωτερικού δικτύου μέσης τάσης 20kV:** Περιλαμβάνει την κατασκευή του εξωτερικού, εναερίου συνήθως, δικτύου μέσης τάσης, το οποίο συνδέει το Πάρκο με τον υποσταθμό ή το δίκτυο μέσης τάσης. Τοποθετούνται ξύλινοι στύλοι με ειδικούς μονωτήρες, απλώνονται και τανύζονται τα καλώδια και το δίκτυο ολοκληρώνεται με τις ειδικές διατάξεις και συνδέσεις (γειώσεις, αντικεραυνική προστασία, κλπ).
- iii. **Κατασκευή υποσταθμού μέσης - υψηλής τάσης 20kV/150kV:** Περιλαμβάνει την πλήρη κατασκευή του υποσταθμού, δηλαδή την γενική διαμόρφωση του οικοπέδου, τις προσβάσεις σε αυτό, την κατασκευή του κτιρίου του υποσταθμού με όλο του τον εξοπλισμό και τις ειδικές βάσεις του, την προμήθεια και τοποθέτηση του ή των μετασχηματιστών, την κατασκευή των ικριωμάτων, των γειώσεων, του τοπικού και περιμετρικού φωτισμού, των αλεξικέραυνων προστασίας, των ειδικών θεμελιώσεων και των υπογείων καναλιών, καθώς και της περίφραξης.

- iv. **Κατασκευή δικτύου σύνδεσης στην υψηλή τάση 150kV:** Περιλαμβάνει την κατασκευή του δικτύου σύνδεσης του υποσταθμού με το πλησιέστερο δίκτυο υψηλής τάσης. Η κατασκευή αποτελείται από μεταλλικούς πυλώνες, τα εναέρια καλώδια υψηλής, μονωτήρες και τις διατάξεις σύνδεσης και απασφάλισης.
- v. **Κατασκευή δικτύου επικοινωνιών:** Περιλαμβάνει την πλήρη κατασκευή δικτύου εσωτερικής διασύνδεσης των μηχανών του Πάρκου, των οικίσκων ελέγχου και του υποσταθμού με οπτικές ίνες ή κάτοπτρα για την αναγκαία σύνδεση, παρακολούθηση και τηλεχειρισμό του Πάρκου από τον κύριο του έργου, τον ΔΕΣΜΗΕ και τον προμηθευτή των μηχανών. Το δίκτυο των οπτικών ινών είναι εναέριο από τον υποσταθμό μέχρι το control room του Πάρκου και κατόπιν γίνεται υπόγειο.

8.5.4.Σύνδεση στο δίκτυο

Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μίας χώρας, για την απόδοση σ' αυτό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία συγκεκριμένη θέση με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό δίκτυο [4].

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Παρακάτω αναφέρονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για τη σύνδεση και παράλληλη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής με τα δίκτυα διανομής, καθώς και ο απαιτούμενος εξοπλισμός ζεύξης και προστασίας, με στόχο την αποτελεσματική αντιμετώπιση της πλειονότητας των περιπτώσεων.

Οι τεχνικές προδιαγραφές που περιγράφονται αφορούν στη σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο μέσης τάσης (MT), στόχος της οποίας είναι η διασφάλιση της ομαλής συνεργασίας των εγκαταστάσεων με το δίκτυο, η ασφάλεια προσώπων και εγκαταστάσεων και η εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ισχύος. Βασικά κριτήρια και προϋποθέσεις που

εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι τα ακόλουθα:

- Επάρκεια του δικτύου (γραμμών, μετασχηματιστών κλπ.)
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμης κατάστασης)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων-δικτύου
- Επίπτωση στη λειτουργία συστημάτων Τηλεχειρισμού Ακουστικής Συχνότητας (ΤΑΣ)

Για τον έλεγχο της συμβατότητας των εγκαταστάσεων παραγωγής με το δίκτυο, ο παραγωγός υποβάλλει τις αναγκαίες πληροφορίες για το μέγεθος και τον τύπο των γεννητριών που πρόκειται να συνδεθούν και προσκομίζει πιστοποιητικά μετρήσεων, τα οποία παρέχουν τα αναγκαία στοιχεία για την τεχνική αξιολόγηση της δυνατότητας σύνδεσης σε συγκεκριμένο σημείο του Δικτύου. Τα χαρακτηριστικά του Δικτύου παρέχονται από τη ΔΕΗ Α.Ε., η οποία επιτελεί τον ρόλο του Διαχειριστή του Δικτύου.

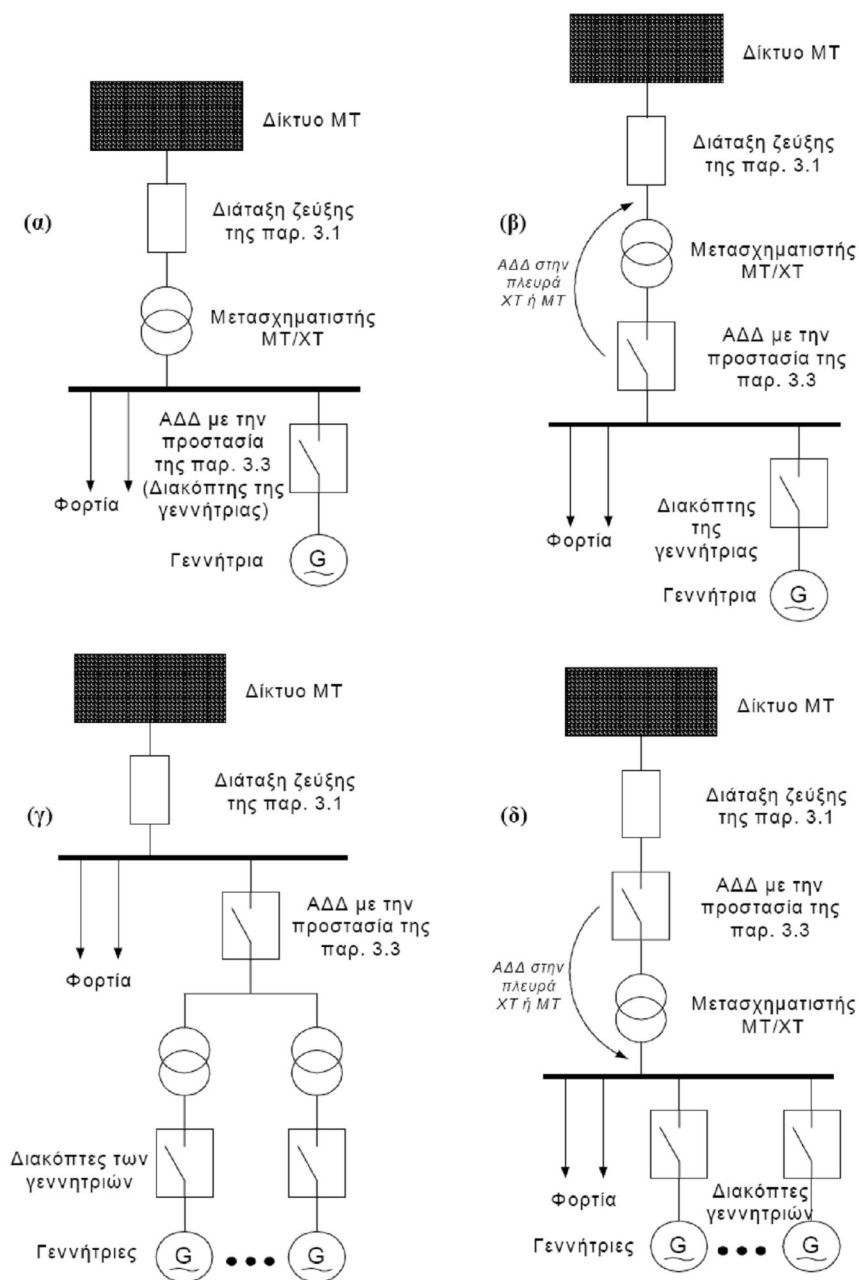
Η σύνδεση εγκατάστασης παραγωγής (ή εγκατάστασης καταναλωτή που περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής) στο δίκτυο γίνεται μέσω διάταξης ζεύξης, η οποία πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα διακοπής ρεύματος φορτίου, να περιλαμβάνει μέσο ορατής απόζευξης και να είναι ανά πάσα στιγμή προσιτή στο προσωπικό της ΔΕΗ. Για την επιλογή των στοιχείων και τη διαμόρφωση της διάταξης ζεύξης, η οποία βρίσκεται συνήθως στον Υ/Σ ζεύξης της συνδεόμενης εγκατάστασης, εφαρμόζονται οι σχετικές οδηγίες (π.χ. Οδηγία Διανομής 34 της ΔΕΗ, «Παροχές ΜΤ») και η τρέχουσα πρακτική. Η διάταξη ζεύξης πρέπει να διαθέτει τα αναγκαία μέσα προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων στο εσωτερικό των εγκαταστάσεων, τα οποία πρέπει να συνεργάζονται με τα μέσα προστασίας του δικτύου της ΔΕΗ.

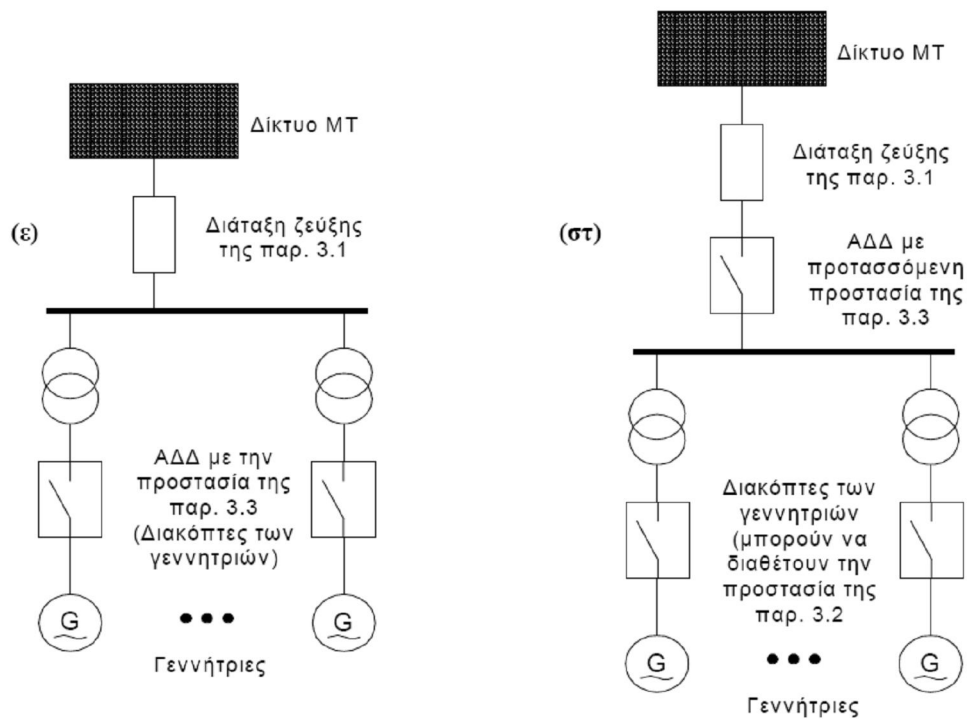
Σε εγκαταστάσεις παραγωγής με περισσότερες από μία μοναδιαίες εγκαταστάσεις, οι οποίες συνδέονται στον υποσταθμό ζεύξης μέσω εσωτερικού δικτύου ΜΤ, όπως είναι τα αιολικά πάρκα, συνιστάται η εγκατάσταση προτασσόμενης προστασίας απόζευξης, η οποία αποσυνδέει κεντρικά το σύνολο των εγκαταστάσεων παραγωγής. Η προστασία αυτή πρέπει να επενεργεί σε διακόπτη ισχύος, ο οποίος μπορεί να αναλάβει και τη λειτουργία της διάταξης ζεύξης.

Για την επιλογή των διατάξεων ζεύξης πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέγιστη ισχύς βραχυκύκλωσης, στην οποία συμβάλλει τόσο το δίκτυο όσο και οι μονάδες των γεννητριών

(ιδιαίτερα στην περίπτωση εγκαταστάσεων με σύγχρονες γεννήτριες). Η στάθμη βραχυκύκλωσης που προκύπτει δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο των 250 MVA. Σε αντίθετη περίπτωση ο παραγωγός πρέπει να λαμβάνει μέτρα περιορισμού του ρεύματος βραχυκύκλωσης των εγκαταστάσεών του.

Για τις γειώσεις του υποσταθμού ζεύξης της εγκατάστασης εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στις σχετικές Οδηγίες της ΔΕΗ. Γενικά, η μέθοδος γείωσης των εγκαταστάσεων παραγωγών είναι αυτή που εφαρμόζει η ΔΕΗ, δηλαδή η ουδετέρωση (εκτός ορισμένων περιοχών της Αττικής, όπου εφαρμόζεται ακόμα η άμεση γείωση). Επίσης, πρέπει να υφίσταται η δυνατότητα γείωσης μέσω καταλλήλων συσκευών των στοιχείων που πρέπει να γειώνονται για την εκτέλεση εργασιών.





Σχήμα 8.10: Παραδείγματα σύνδεσης εγκαταστάσεων παραγωγής στο δίκτυο MT.
 (α) Μία γεννήτρια χωρίς δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας. (β) Μία γεννήτρια με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας. (γ) Περισσότερες γεννήτριες χωρίς δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας. (δ) Περισσότερες γεννήτριες με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας. (ε) Εγκατάσταση παραγωγής με περισσότερες γεννήτριες, χωρίς κεντρικό διακόπτη διασύνδεσης (Διακόπτες των γεννητριών ως ΑΔΔ). (στ) Εγκατάσταση παραγωγής με περισσότερες γεννήτριες και κεντρικό διακόπτη διασύνδεσης με προτασόμενη προστασία απόζευξης.

Εάν η εγκατάσταση παραγωγής συνδέεται σε γραμμή MT με σύστημα αυτόματης επανάζευξης (διακόπτης στην αναχώρηση της γραμμής ή ΔΑΕ σε ενδιάμεσο σημείο), τότε είναι αναγκαίο το σύστημα προστασίας απόζευξης να αποσυνδέει τις μονάδες παραγωγής οπωσδήποτε πριν από τη λειτουργία επαναφοράς του διακόπτη. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται επιπλέον ότι το σφάλμα στο απομονωμένο τμήμα του δικτύου δεν εξακολουθεί να τροφοδοτείται από τις γεννήτριες του παραγωγού, προϋπόθεση αναγκαία για την αποτελεσματικότητα του συστήματος βραχείας διακοπής/ταχείας επανάζευξης των εναερίων δικτύων MT.

Το σύστημα προστασίας απόζευξης περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον προστασίες υπότασης, υπέρτασης, υποσυχνότητας και υπερσυχνότητας. Η επιτήρηση της τάσης πρέπει

να γίνεται και στις τρεις φάσεις, ώστε να ανιχνεύονται ακόμη και μονοφασικές διαταραχές. Η επιτήρηση της συχνότητας αρκεί να γίνεται σε μία φάση. Το σύστημα προστασίας απόζευξης μπορεί να περιλαμβάνει και επιτήρηση της ομοπολικής συνιστώσας της τάσης, U_0 , για την ανίχνευση σφαλμάτων γης επί της γραμμής όπου συνδέεται η εγκατάσταση παραγωγής. Μπορεί ακόμη να διαθέτει ηλεκτρονόμο υπερέντασης για την ανίχνευση της τροφοδότησης εξωτερικών σφαλμάτων από την εγκατάσταση παραγωγής, εφόσον όμως μπορεί να εξασφαλιστεί η επιλογική του συνεργασία με τα λοιπά μέσα προστασίας έναντι υπερεντάσεων της εγκατάστασης και η μη διέγερσή του από τα ρεύματα ζεύξης αυτής.

Για την ανίχνευση της απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις ηλεκτρονόμοι απότομης μεταβολής του ανύσματος της τάσης, απότομης μεταβολής του φορτίου, ρυθμού μεταβολής της συχνότητας κ.ά.

Σε εγκαταστάσεις παραγωγής μεγάλου μεγέθους μπορεί να εφαρμοστεί αλληλένδεση (transfer trip) του ΑΔΔ της εγκατάστασης με τον διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται η άμεση απόζευξη της εγκατάστασης για οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη της γραμμής και αποκλείεται η ασύγχρονη επανάζευξή του. Το ίδιο επιτυγχάνεται με την εφαρμογή συστήματος διαφορικής προστασίας σε εγκαταστάσεις που συνδέονται μέσω αποκλειστικών καλωδιακών γραμμών.

Μετά από λειτουργία απόζευξης του ΑΔΔ, η ζεύξη του πρέπει να καθυστερήσει μέχρι να επανέλθει η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός της προβλεπόμενης ζώνης κανονικής λειτουργίας. Για την προστασία της εγκατάστασης παραγωγής, συνιστάται να προβλεφθεί μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των λεπτών της ώρας μεταξύ της επανόδου της τάσης και της ζεύξης της εγκατάστασης, ώστε να έχουν ολοκληρωθεί ενδεχόμενοι χειρισμοί ζεύξεων στο δίκτυο. Για εγκαταστάσεις με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας, η ζεύξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται από αυτόματο σύστημα συγχρονισμού ακριβείας.

Οι λειτουργίες της προστασίας απόζευξης της εγκατάστασης μπορεί να υλοποιούνται μέσω συμβατικών ηλεκτρονόμων ή να αποτελούν μέρος ολοκληρωμένων ψηφιακών συστημάτων προστασίας. Σε κάθε περίπτωση, η απώλεια της τάσης τροφοδότησης των συσκευών προστασίας και ζεύξης πρέπει να οδηγεί αυτομάτως στην απόζευξη της εγκατάστασης παραγωγής, επειδή, σε αντίθετη περίπτωση, σφάλματα στο δίκτυο της ΔΕΗ δεν οδηγούν σε λειτουργία των ηλεκτρονόμων και απόζευξη.

Για τη διεξαγωγή δοκιμών λειτουργίας των διατάξεων προστασίας πάντοτε προβλέπεται κατάλληλο σημείο πρόσβασης (π.χ. σύστημα ακροδεκτών με διαμήκη διαχωρισμό και αναμονές δοκιμών). Το σύστημα προστασίας ασφαρίζεται/σφραγίζεται και οποιαδήποτε μεταβολή στις ρυθμίσεις του γίνεται κατόπιν έγκρισης από τη ΔΕΗ.

8.6.Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων

8.6.1.Εισαγωγή

Κατά τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι τα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες βλαβών σε ανεμογεννήτριες, με αποτέλεσμα σημαντική απώλεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές και την μείωση της διαθεσιμότητας τους. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι, συνήθως, οι πλέον ευνοϊκές τοποθεσίες εγκατάστασης αιολικών πάρκων είναι περιοχές σε μεγάλο υψόμετρο, όπου υπάρχει εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, το περιβάλλον αυτό αυξάνει το βαθμό έκθεσης των ανεμογεννητριών σε κίνδυνους κεραυνοπληξιών. Επιπλέον, η τρέχουσα τάση αύξησης του μεγέθους και του συνολικού ύψους των ανεμογεννητριών, καθώς και του ύψους της πλώμνης, είναι πιθανό να οδηγήσει σε μεγαλύτερες απώλειες λόγω κεραυνοπληξιών. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται ο καθορισμός και η λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας και ειδικότερα ο κατάλληλος σχεδιασμός των γειώσεων [5].

8.6.2.Συστήματα γειώσεων

Η γείωση ενός αιολικού πάρκου, όπως κάθε άλλου ηλεκτρικού συστήματος, επιτυγχάνεται συνδέοντας μέσω μίας μικρής σύνθετης αντίστασης τον ηλεκτρικό εξοπλισμό με την γη με σκοπό τα ακόλουθα:

- Λειτουργία των συστημάτων προστασίας,
- Εξασφάλιση δυναμικού αναφοράς για τον εξοπλισμό,
- Πρόληψη των υψηλών δυναμικών λόγω σφαλμάτων και κεραυνοπληξιών που προκαλούν βλάβες στον εξοπλισμό και κίνδυνο στις ανθρώπινες ζωές

Ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης γίνεται σύμφωνα με κριτήρια καθορισμού της ασφάλειας του ανθρώπινου οργανισμού κατά την διάρκεια βραχυκυκλωμάτων σύμφωνα με τα διάφορα πρότυπα IEEE, IEC κλπ. Παρόμοια κριτήρια εκτίμησης του κινδύνου για τον ανθρώπινο οργανισμό κατά την διάρκεια κεραυνών δεν είναι τόσο καλά καθορισμένα, αλλά μπορούν να δοθούν με βάση τον κανονισμό IEC ή άλλους κανονισμούς. Η αντοχή του εξοπλισμού σε κεραυνικές υπερτάσεις λαμβάνει υπόψη της την πιθανότητα

κεραυνοπληξίας, η οποία θα προκαλέσει υπέρταση πάνω από κάποιο συγκεκριμένο όριο αντοχής. Στην συνέχεια, αναφέρονται χαρακτηριστικά μεγέθη με βάση τα οποία καθορίζεται η προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων:

- Ανύψωση δυναμικού γης (GPR - Ground Potential Rise) είναι η μέγιστη τιμή του δυναμικού που μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα σύστημα γείωσης, μεταξύ ενός σημείου του και ενός σημείου σε μακρινή απόσταση, το οποίο θεωρητικά έχει το δυναμικό άπειρης γης. Η μέγιστη τιμή του δυναμικού εμφανίζεται στο σημείο έγχυσης του ρεύματος. Αυτή είναι η θέση του GPR.

- Βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής

1. Βηματική τάση (Step Voltage) είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, το οποίο δεν βρίσκεται με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοικτού βηματισμού.
2. Τάση επαφής (Touch Voltage) είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικού γειωμένου ικρίωματος και σημείου σε απόσταση 1m που στέκεται άνθρωπος και ακουμπά με τα χέρια του το ικρίωμα.
3. Ανεκτή βηματική τάση είναι η μέγιστη βηματική τάση που μπορεί να αντέξει οργανισμός βάρους 70kg και δίνεται από την σχέση

$$E_{step} = [1000 + 6 \cdot C_s(h_s, k) \cdot \rho_s] \cdot 0,157 / \sqrt{t_s}$$

4. Ανεκτή τάση επαφής είναι η μέγιστη τάση επαφής που μπορεί να αντέξει οργανισμός βάρους 70kg και δίνεται από την σχέση

$$E_{TOUCH-70} = [1000 + 1,5 \cdot C_s(h_s, k) \cdot \rho_s] \cdot 0,157 / \sqrt{t_s}$$

όπου για τις παραπάνω σχέσεις έχουμε

t_s = η διάρκεια της καταπόνησης σε sec

ρ_s = η ειδική αντίσταση χαλκιού στην επιφάνεια του εδάφους σε Ωm και

$$C_s(h_s, k) = \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(K^n / \sqrt{1 + (2 \cdot n \cdot h_s / 0,08)^2} \right) \right] / 0,96$$

όπου: $K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$

n = αριθμός των αγωγών του δικτύου γείωσης

h_s = το πάχος του χαλκιού σε m

ρ = η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

5. Τάση επαφής βρόχου (Mesh Voltage) είναι η δυσμενέστερη τάση επαφής που παρουσιάζεται σε βρόχο του δικτύου γείωσης και συνήθως μεταξύ ενός

σημείου της επιφάνειας του εδάφους στο μέσο μεταξύ δύο τελευταίων αγωγών γείωσης και του ίδιου του δικτύου.

Γενικότερα, ισχύει ότι ο ανθρώπινος οργανισμός είναι ανθεκτικότερος σε ρεύματα υψηλότερων συχνοτήτων, δηλαδή μπορεί να αντέξει μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων, όταν είναι υψηλής συχνότητας. Αντίθετα, υπάρχει πρόβλημα, όσον αφορά την αντοχή του εξοπλισμού.

8.6.3.Απόκριση συστήματος γείωσης σε βραχυκυκλώματα και κεραυνικά πλήγματα

Παρά το ότι χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα γείωσης για την προστασία του αιολικού πάρκου τόσο από τα βραχυκυκλώματα, όσο και από τους κεραυνούς, η απόκριση στις δύο αυτές διαφορετικές διεγέρσεις είναι πολύ διαφορετική, λόγω των όρων υψηλής συχνότητας που περιέχει το κεραυνικό ρεύμα. Πιο αναλυτικά, μία τυπική μορφή κεραυνικού ρεύματος θεωρείται ότι έχει μέσο χρόνο ανύψωσης σε μία μέγιστη τιμή 30 kA ίσο με 5.5 μs και χρόνο μισής τιμής 75 μs. Αυτή η κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα την έγχυση όρων μεγάλης συχνότητας, οι οποίοι μεταφέρονται στο σύστημα γείωσης. Η αυτεπαγωγή του συστήματος γείωσης, η οποία είναι σημαντική σε σύγκριση με την αντίσταση για κάθε σύστημα μεγάλης έκτασης, προκαλεί την επιπλέον αύξηση της συνολικής σύνθετης αντίστασης λόγω των όρων υψηλής συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι οι κλασικές μέθοδοι υπολογισμού της αντίστασης ενός συστήματος γείωσης βασισμένες σε απλές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψη τους μόνο την ωμική συμπεριφορά του συστήματος σε βιομηχανικές συχνότητες είναι ακατάλληλες στη περίπτωση της μελέτης της συμπεριφοράς αιολικών πάρκων σε κεραυνικά πλήγματα, αφού πρόκειται για καταναμημένα συστήματα μεγάλης έκτασης.

8.6.4.Απαιτούμενος βαθμός προστασίας – Συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων – Κίνδυνος έκθεσης

Η απαιτούμενη αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών, είναι συνάρτηση της συχνότητας των πληγμάτων που δέχονται αυτές, οπότε του κινδύνου έκθεσής τους στους κεραυνούς [5].

Ο κίνδυνος έκθεσης μίας κατασκευής στους κεραυνούς, εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τον βαθμό χρησιμοποίησης της κατασκευής
- Τη φύση των υλικών από τα οποία συνίσταται η κατασκευή
- Τη θέση-τοποθεσία της κατασκευής

- Το ύψος της κατασκευής

Πιο αναλυτικά, το πρώτο στάδιο των υπολογισμών για την εκτίμηση του αριθμού των πληγμάτων σε μία κατασκευή ανά έτος είναι η γνώση του αριθμού των κεραυνών στη συγκεκριμένη περιοχή ανά έτος. Αν δεν είναι γνωστός ο αριθμός των κεραυνών από στατιστικά στοιχεία, τότε μπορεί να εκτιμηθεί από τις μέρες καταιγίδας ανά έτος, στοιχείο που είναι διαθέσιμο. Ισχύει η σχέση

$$N_g = \alpha(T_d)^b$$

όπου N_g είναι ο αριθμός των πληγμάτων ανά km^2 και ανά έτος και T_d είναι ο αριθμός ημερών καταιγίδας ανά έτος. Οι συντελεστές a , b λαμβάνουν τιμές, οι οποίες αλλάζουν ανάλογα με την περιοχή (για την Ελλάδα είναι $a=0.04$, $b=1.25$).

Για τον υπολογισμό της ετήσιας συχνότητας των κεραυνικών πληγμάτων σε εγκατάσταση χρησιμοποιείται μια δεύτερη σχέση:

$$N_s = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6}$$

όπου N_s είναι ο αριθμός των πληγμάτων στην κατασκευή ανά έτος, και A_e είναι η ισοδύναμη επιφάνεια σε km^2 . Η ισοδύναμη επιφάνεια μπορεί να ορισθεί ως η επιφάνεια της γης, η οποία έχει την ίδια ετήσια συχνότητα πτώσης κεραυνών, με την κατασκευή.

Η ισοδύναμη επιφάνεια για μεμονωμένες κατασκευές μπορεί να υπολογισθεί ως η περιοχή A_e , η οποία περικλείεται από μία γραμμή ορίου. Η γραμμή αυτή προκύπτει από την τομή της επιφάνειας της γης και μίας ευθείας με κλίση $1/3$, η οποία περνάει από τα υψηλότερα σημεία της κατασκευής, και περιστρέφεται γύρω από αυτά.

Στην γενική περίπτωση, η μέθοδος μπορεί να τροποποιηθεί πολλαπλασιάζοντας με ένα συντελεστή C_e ως

$$N_s = N_g \cdot A_e \cdot C_e \cdot 10^{-6},$$

όπου

| Σχετική θέση της κατασκευής | C_e |
|---|-------|
| Κατασκευή σε μία μεγάλη περιοχή όπου υπάρχουν και άλλα αντικείμενα ή κατασκευές παρόμοιου ύψους (π.χ. δάσος) | 0.25 |
| Κατασκευή, περιτριγυρισμένη από μικρότερες κατασκευές | 0.50 |
| Μεμονωμένες κατασκευές (δεν υπάρχουν άλλες κατασκευές ή αντικείμενα σε ακτίνα $3h$ όπου h το ύψος της κατασκευής) | 1.00 |
| Μεμονωμένη κατασκευή σε λόφο ή στην κορυφή του | 2.00 |

Η πιθανότητα να πέσουν κεραυνοί σε οποιαδήποτε διάταξη, ανά έτος είναι το γινόμενο της ετήσιας συχνότητας των κεραυνικών πληγμάτων σε εγκατάσταση, και της επιφάνειας συλλογής της κατασκευής.

Ο πιθανός αριθμός πληγμάτων είναι $P=A_c*N_g*10^{-6}$. Εάν $P>10^{-5}$ ή σε κάποιες περιπτώσεις $P>10^{-4}$ απαιτείται αντικεραυνική προστασία.

8.7.Τυπικός σχεδιασμός του ηλεκτρικού μέρους ενός αιολικού πάρκου

Μία κλασσική ανεμογεννήτρια περιέχει μία ασύγχρονη γεννήτρια υπό πολική τάση 380V (μικρές A/Γ) ή 630V (μεγάλες A/Γ), η οποία τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής 20 ή 15kV μέσω ενός τοπικού μετασχηματιστή τυλίγματος αστέρα-τριγώνου. Η πλευρά υψηλής τάσης του τοπικού μετασχηματιστή συνδέεται με το καλώδιο διανομής του αιολικού πάρκου. Για μεγαλύτερα αιολικά πάρκα, το σύστημα των καλωδίων συνδέεται συνήθως στο τύλιγμα μετασχηματιστή αστέρα στον υποσταθμό του αιολικού πάρκου. Ο αστέρας είναι γειωμένος μέσω αντίστασης, ώστε να ελέγχεται το επίπεδο σφάλματος γείωσης του αιολικού πάρκου [5].

Η προστασία του ηλεκτρικού μέρους του αιολικού πάρκου, στην πράξη γίνεται χρησιμοποιώντας ασφάλειες, ή ηλεκτρονόμους σφάλματος προς γη. Τα μέσα αυτά προστασίας ενεργοποιούνται, όταν το ρεύμα σφάλματος υπερβεί κάποια τιμή. Όσο μικρότερη τιμή έχει η σύνθετη αντίσταση της γείωσης, τόσο ευκολότερη είναι να αναγνωριστούν οι καταστάσεις σφάλματος.

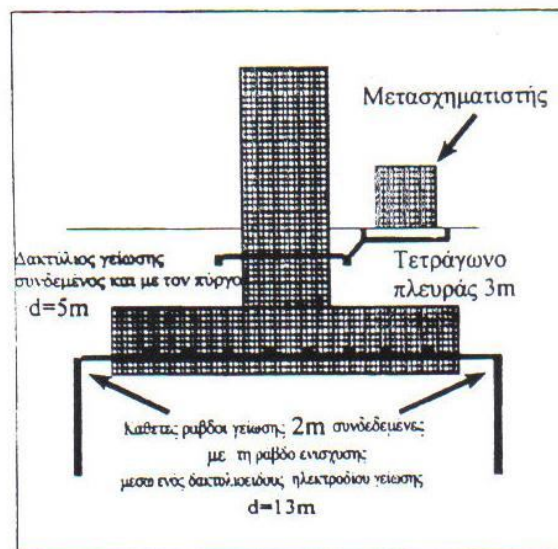
Τα κεραυνικά πλήγματα που δέχεται μία ανεμογεννήτρια αυξάνουν το τοπικό δυναμικό της γης, οπότε προκαλούνται μεγάλες διαφορές δυναμικού μεταξύ των αγωγών φάσεων των καλωδίων ισχύος και της μόνωσης, καθώς και μεταξύ του τυλίγματος υψηλής τάσης στο μετασχηματιστή της ανεμογεννήτριας και του γειωμένου τυλίγματος χαμηλής τάσης. Η διαφορά αυτή του δυναμικού, μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή είτε της μόνωσης του καλωδίου, είτε του τυλίγματος του μετασχηματιστή, και να προκαλέσει βλάβη στο μέρος αυτό του εξοπλισμού. Όσο μικρότερη είναι η σύνθετη αντίσταση γείωσης, τόσο χαμηλότερη είναι η ανύψωση του δυναμικού η οποία προκαλείται από τον κεραυνό, και τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα καταστροφής της μόνωσης.

Η διαρροή ρεύματος στο έδαφος όταν πέφτει κεραυνός, είτε στην περίπτωση βιομηχανικού βραχυκυκλώματος έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωση του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Οι τιμές αυτών των δυναμικών θα εξαρτώνται και από τη σύνθετη αντίσταση του συστήματος γείωσης, η οποία θα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να

ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος για ανθρώπινες ζωές λόγω υψηλών βηματικών τάσεων, και των τάσεων επαφής.

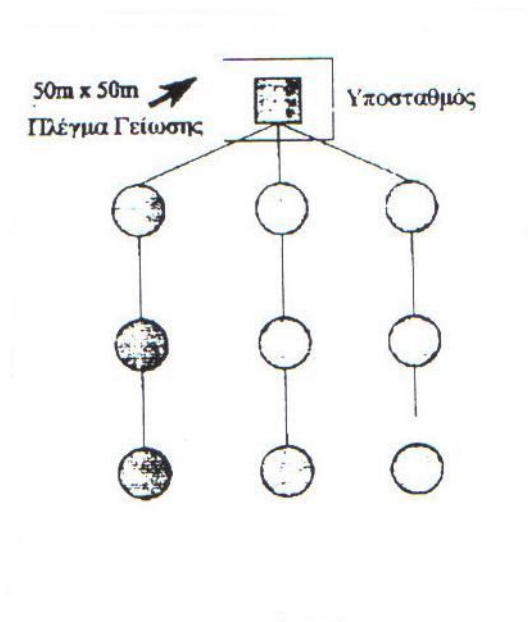
8.8.Περιγραφή τυπικού συστήματος γείωσης αιολικών πάρκων

Η γείωση κάθε μεμονωμένης ανεμογεννήτριας γίνεται συνήθως τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο σε σχήμα δακτυλίου γύρω από τη βάση της και συνδέοντάς το μέσω της βάσης στον πύργο της Α/Γ (Σχήμα 8.11). Η ράβδος ενίσχυσης της βάσης συνδέεται επίσης απ' ευθείας ή μέσω του πύργου της Α/Γ στο ηλεκτρόδιο και αποτελεί μέρος της γείωσης, αφού η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος είναι περίπου ίση με αυτή του εδάφους. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται συχνά κατακόρυφες ράβδοι ή οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης, ώστε να επιτυγχάνεται μία καθορισμένη τιμή της αντίστασης γείωσης. Η τιμή αυτή έχει καθορισθεί από διάφορα πρότυπα (π.χ. British Standards) ως 10Ωm ή μικρότερη, πριν να γίνει σύνδεση με οποιοδήποτε άλλο σύστημα.



Σχήμα 8.11: Διάταξη γείωσης Α/Γ

Οι μεμονωμένες γειώσεις των ανεμογεννητριών συνδέονται συνήθως μεταξύ τους με κάποιο μεταλλικό αγωγό ή μέσω της επένδυσης του κυρίου καλωδίου μεταφοράς της παραγόμενης ισχύος (Σχήμα 8.12). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της συνολικής σύνθετης αντίστασης. Εκεί, όπου το αιολικό πάρκο είναι εγκατεστημένο σε περιοχές υψηλής ειδικής αντίστασης του εδάφους, η γείωση κάθε Α/Γ μπορεί να συνδεθεί με ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο επιπλέον της σύνδεσης που παρέχεται από το επενδεδυμένο καλώδιο μεταφοράς ισχύος.



Σχήμα 8.12: Διάταξη γείωσης αιολικού πάρκου

8.9. Ανάστροφη αγωγή αλεξικέραυνων – Εφαρμογή σε αιολικά πάρκα

Παρά το γεγονός ότι μια εγκατάσταση αιολικού πάρκου προστατεύεται με τους τρόπους που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει παρατηρηθεί η εμφάνιση υπερτάσεων και η καταστροφή εξοπλισμού σε ανεμογεννήτριες που δεν έχουν χτυπηθεί άμεσα από κεραυνό [6].

Το πλήγμα μιας ανεμογεννήτριας αιολικού πάρκου από κεραυνό μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της εισβολής μιας υπέρτασης σε μία γραμμή διανομής λόγω της ανάστροφης αγωγής αλεξικέραυνου. Στην περίπτωση αυτή, η υπέρταση ρέει από τον πύργο της ανεμογεννήτριας, την οποία έπληξε ο κεραυνός, προς την γραμμή διανομής και προς άλλες ανεμογεννήτριες, οι οποίες δεν είχαν σχέση με το κεραυνικό πλήγμα. Η αιτία του φαινομένου έγκειται στο γεγονός ότι η υψηλή αντίσταση γείωσης έχει ως αποτέλεσμα συχνά να κάνει τα αλεξικέραυνα για τα συστήματα γείωσης των πύργων να λειτουργούν ανάστροφα και να επιτρέπουν την πρόκληση ροής του ρεύματος προς το ηλεκτρικό δίκτυο.

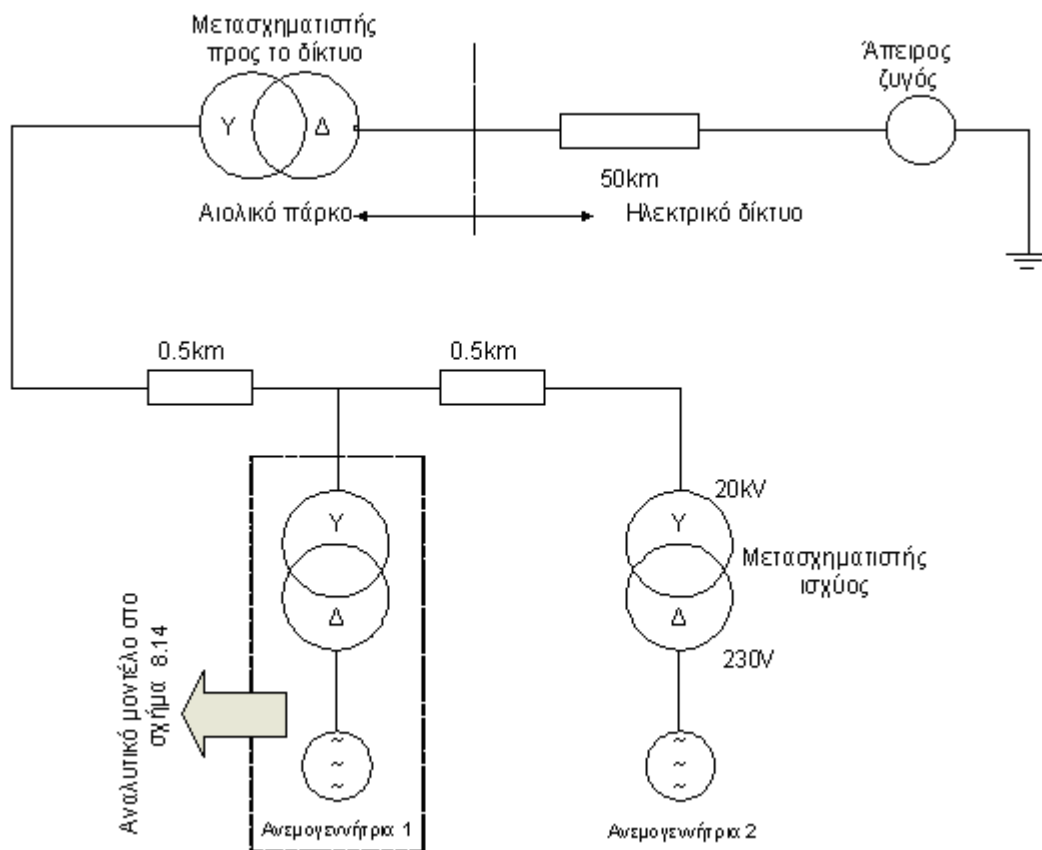
Έχει αναφερθεί ότι αυτή η ανάστροφη αγωγή αλεξικέραυνου μπορεί μερικές φορές να τα καταστρέψει ή να προκαλέσει την κατάρρευση των κυκλωμάτων χαμηλής τάσης, ακόμα και σε μία ανεμογεννήτρια μακριά από το σημείο του κεραυνικού πλήγματος.

Στο κεφάλαιο αυτό ερευνάται η περίπτωση δύο συνδεδεμένων ανεμογεννητριών με την βοήθεια του προγράμματος PSCAD/EMTDC, με στόχο να διευκρινιστεί ο μηχανισμός με τον οποίο η ανάστροφη αγωγή αλεξικέραυνου διαδίδεται σε άλλες ανεμογεννήτριες εκτός από αυτήν η οποία έχει πληγεί απευθείας από τον κεραυνό, καθώς επίσης και την επιρροή που έχει στην απορροφούμενη ενέργεια από το αλεξικέραυνο η σύνδεση των ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή στο κοινό σύστημα γείωσης.

8.10.Το μοντέλο της ανάλυσης

8.10.1.Μοντέλο του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών

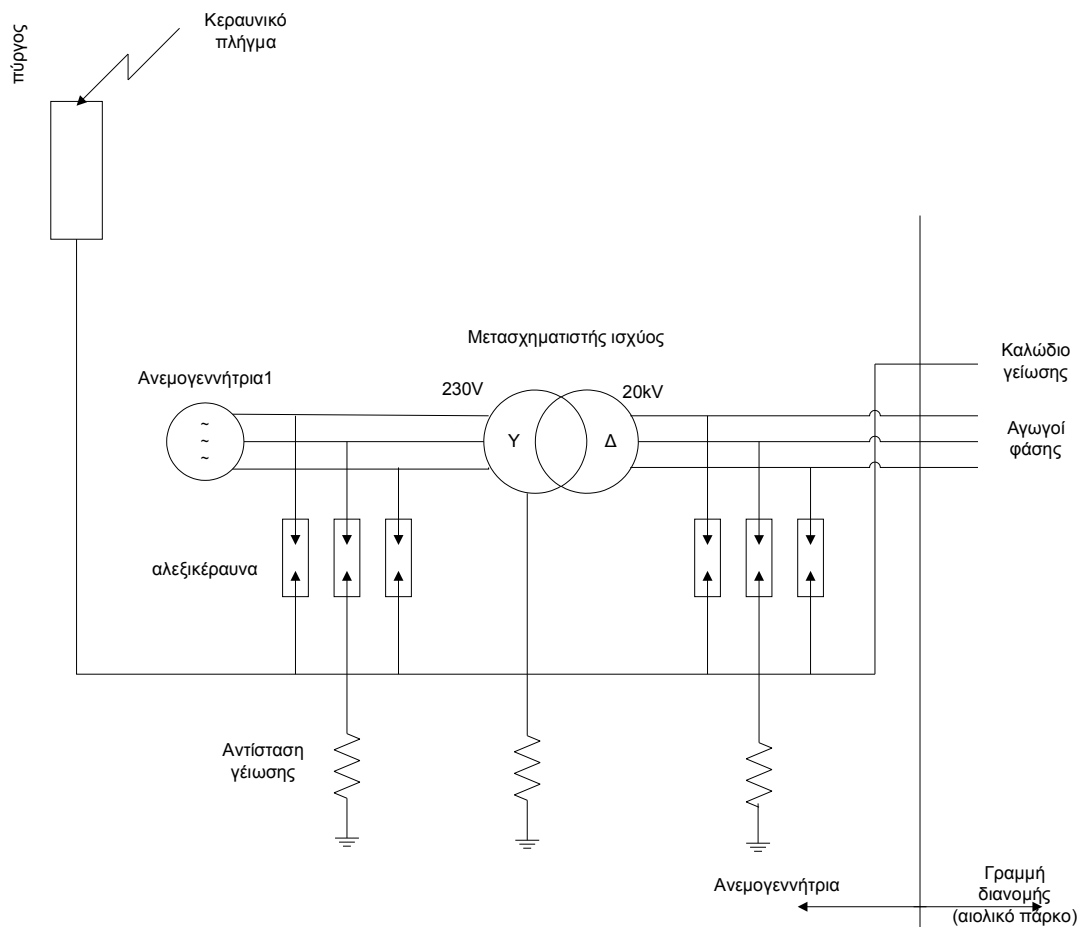
Στο Σχήμα 8.13 εμφανίζεται ένα μοντέλο αιολικού πάρκου με δύο ανεμογεννήτριες, πανομοιότυπες σε λειτουργία και κατάσταση. Αφού στόχος μας ήταν η προσομοίωση της καταστροφής των αλεξικέραυνων που είναι εγκατεστημένα στο αιολικό πάρκο, υποθέσαμε ότι η καταστροφή των πτερυγίων της γεννήτριας, η οποία είχε πραγματικά πληγεί από τον κεραυνό αποφεύχθηκαν με συγκεκριμένα μέτρα πρόληψης [7].



Σχήμα 8.13: Μοντέλο αιολικού πάρκου με δυο ανεμογεννήτριες

Στο παρόν μοντέλο ισχύουν τα παρακάτω:

- Η όλη εγκατάσταση αποτελείται από μία διάταξη δύο ανεμογεννητριών της τάξεως του 1 MW σε απόσταση 0.5km διασυνδέεται στο ηλεκτρικό σύστημα ισχύος μέσω ενός υψηλής τάσης μετασχηματιστή (20 kV / 66 kV).
- Η σύνθετη αντίσταση του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 164Ω , η οποία υπολογίζεται από έναν κατακόρυφο σιδερένιο αγωγό ύψους 60m και ακτίνας 3m, σύμφωνα με μία πειραματική εξίσωση.
- Παρόλο που μια ανεμογεννήτρια ισχύος αποτελείται από ένα κιβώτιο ταχυτήτων, μία σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια, έναν ανορθωτή ρεύματος, έναν τριφασικό αντιστροφέα, κ.ο.κ., για την προσομοίωση αυτή έχει υποθεθεί για απλότητα μόνο μία τριφασική εναλλασσόμενη πηγή τάσης.
- Οι μετασχηματιστές ισχύος για τις γεννήτριες (230V / 20kV) εγκαθίστανται μέσα στους πύργους των ανεμογεννητριών. Τα αλεξικέραυνα προσαρτώνται στο πρωτεύον και δευτερεύον του μετασχηματιστή ισχύος και συνδέονται σε μια κοινή γείωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.14.

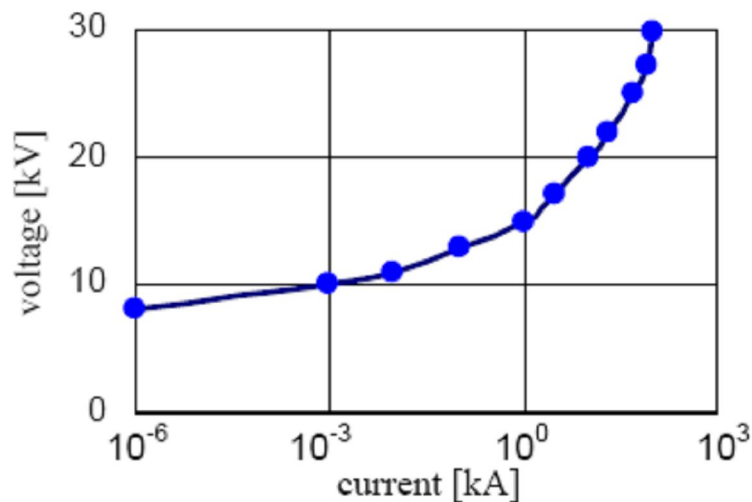


Σχήμα 8.14: Αναλυτικό μοντέλο της κάθε ανεμογεννήτριας

- Η αντίσταση γείωσης είναι 10Ω ή 20Ω.
- Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση τα συστήματα γείωσης των δύο ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή του υποσταθμού δεν συνδέονται, ενώ στη δεύτερη συνδέονται.

8.10.2.Μοντέλο αλεξικέρανου

Για την πληρέστερη προστασία των μετασχηματιστών, τοποθετήθηκαν αλεξικέρανα τόσο στο πρωτεύον (πλευρά χαμηλής τάσης, μεριά της ανεμογεννήτριας), όσο και στο δευτερεύον (πλευρά υψηλής τάσης, μεριά του ηλεκτρικού δικτύου) άκρο του μετασχηματιστή ισχύος. Τα αλεξικέρανα των 20kV έχουν ενέργεια αντοχής 15kJ. Στο Σχήμα 8.15 φαίνεται η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος.



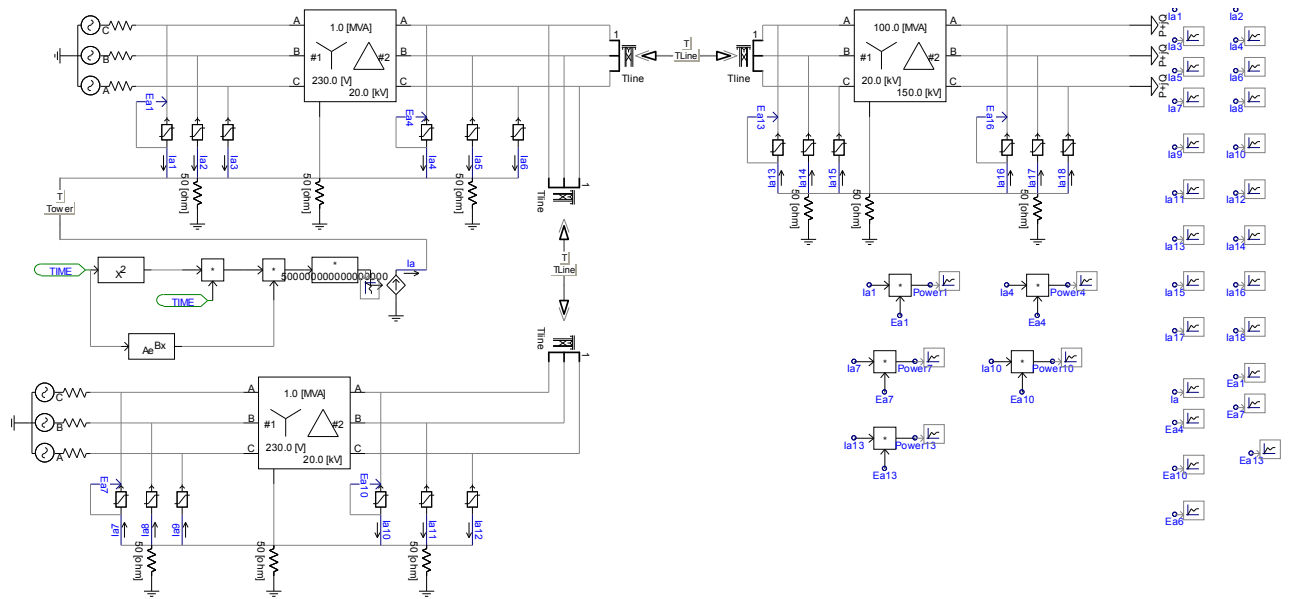
Σχήμα 8.15: Χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος

8.11.Προσομοίωση στο PSCAD

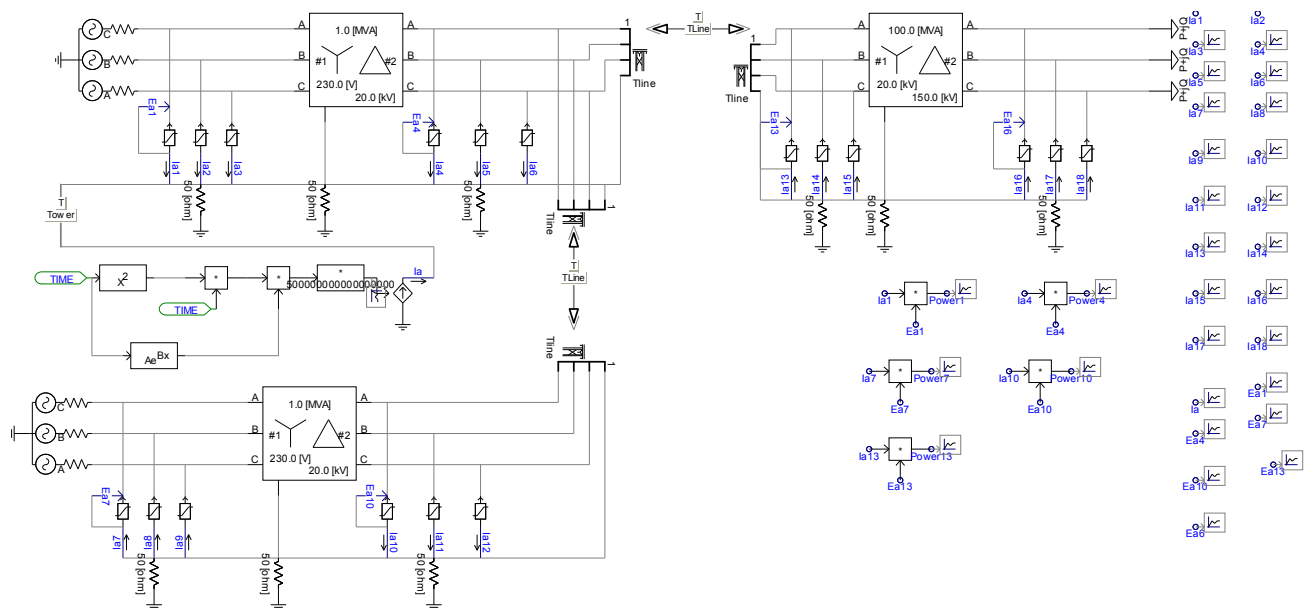
8.11.1.Υπαρξη και μη ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης

Στην ανάλυση που έγινε με την βοήθεια του προγράμματος PSCAD/EMTDC εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση δεν υπήρχε σύνδεση γης μεταξύ των ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή (case1) (Σχήμα 8.16), ενώ στην δεύτερη τόσο οι ανεμογεννήτριες όσο και ο μετασχηματιστής βρίσκονται συνδεδεμένοι στο κοινό σύστημα γείωσης (case2) (Σχήμα 8.17). Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι συγκρίσεις μεταξύ των ενεργειών που υπολογίστηκαν στα αλεξικέρανα για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις

καθώς επίσης και η εξάρτηση των ενεργειών αυτών από τις αλλαγές της αντίστασης γείωσης [8].



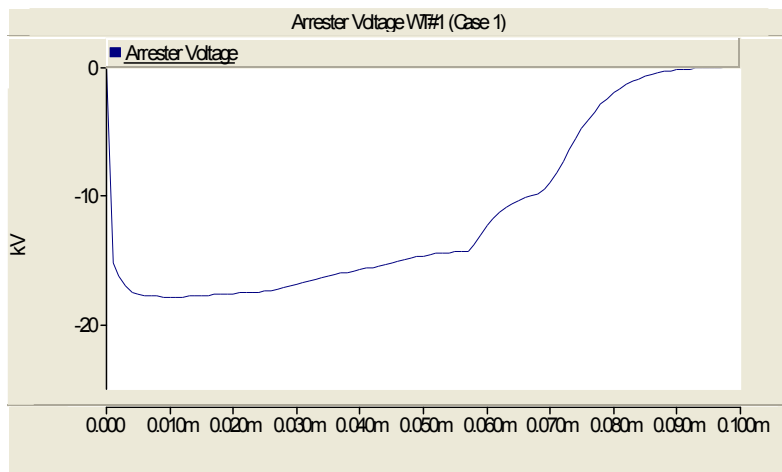
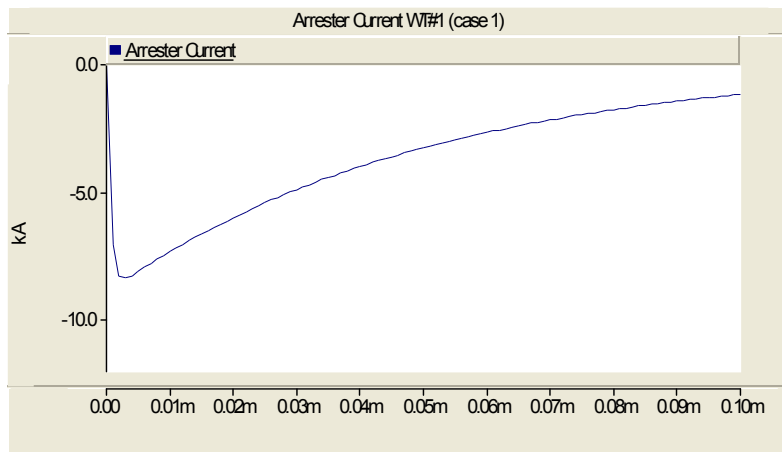
Σχήμα 8.16: Μη ύπαρξη σύνδεση γης μεταξύ των ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή



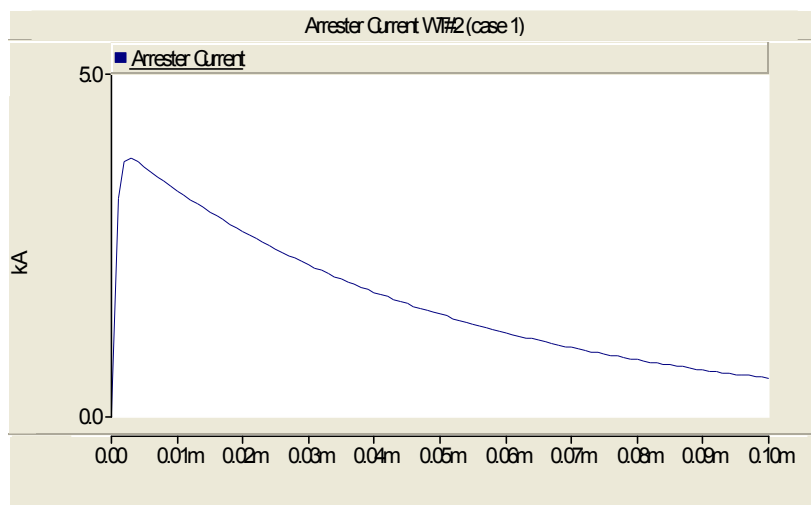
Σχήμα 8.17: Ανεμογεννήτριες και μετασχηματιστής συνδεδεμένοι στο σύστημα γείωσης

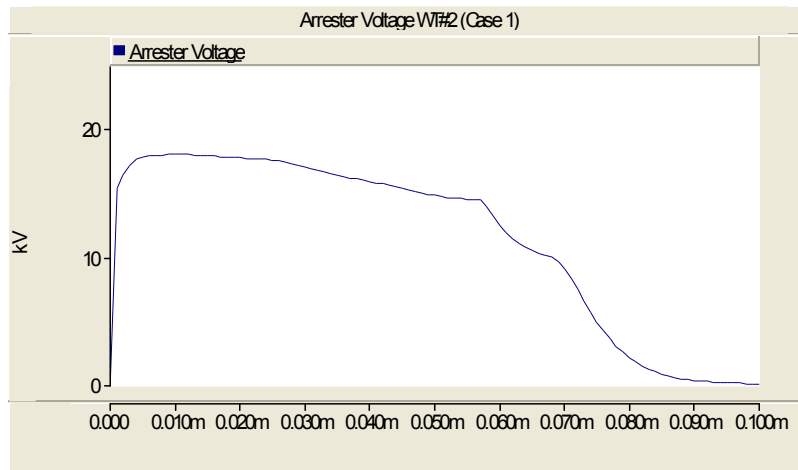
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για τα αλεξικέραυνα των δύο ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή στην περίπτωση της μη ύπαρξης κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης (case1). Θεωρείται ότι η

πρώτη ανεμογεννήτρια (Α/Γ1) είναι εκείνη που έπληξε ο κεραυνός, ενώ η αντίσταση γείωσης είναι ίση με 10Ω .

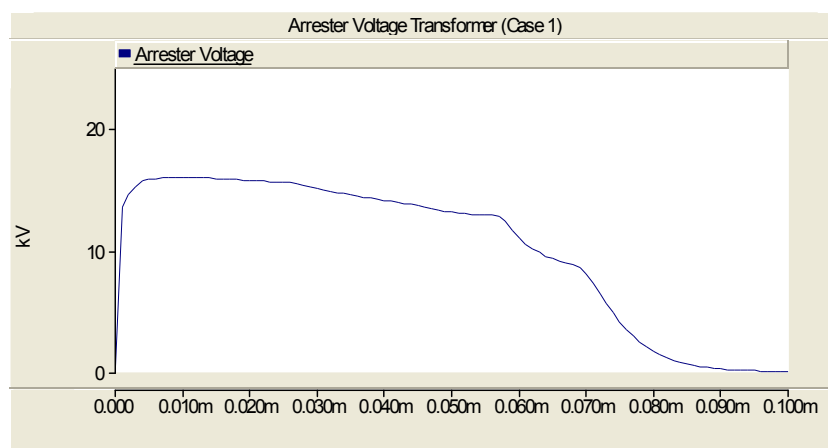
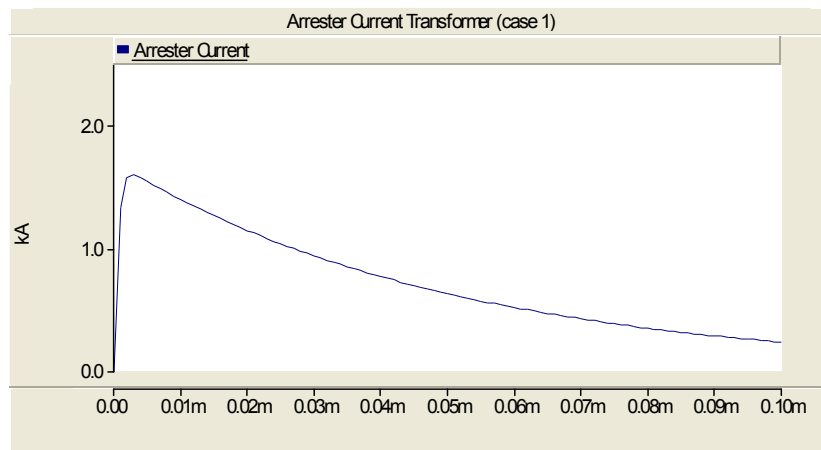


Σχήμα 8.18: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ1 χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω



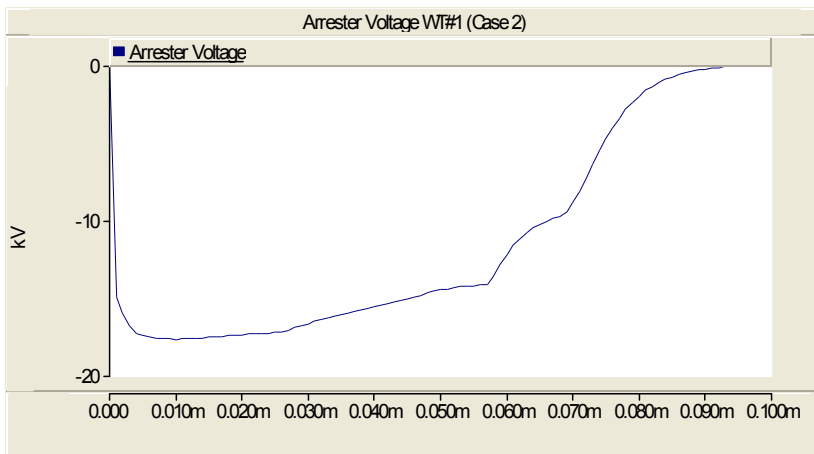
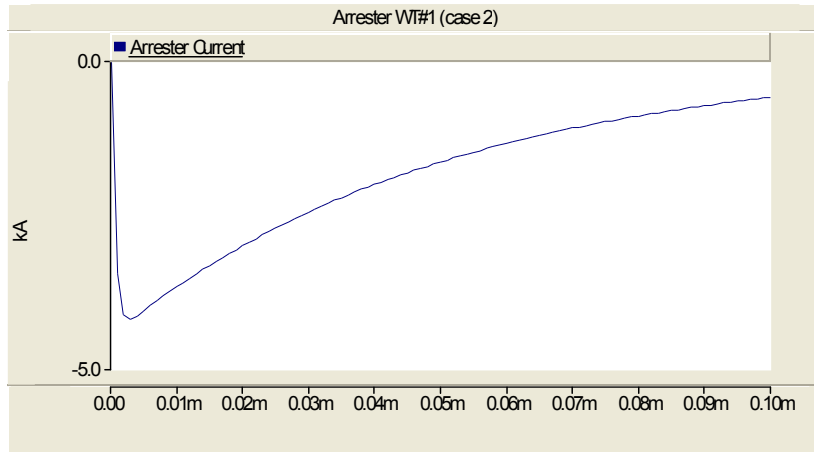


Σχήμα 8.19: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της A/Γ2 χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω

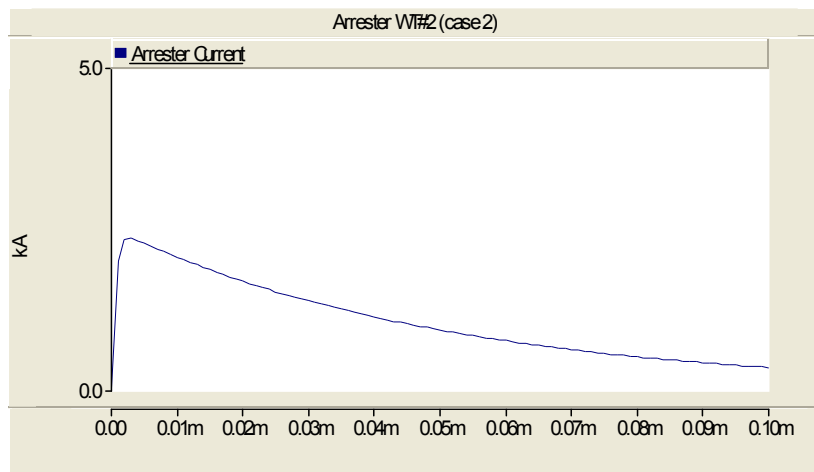


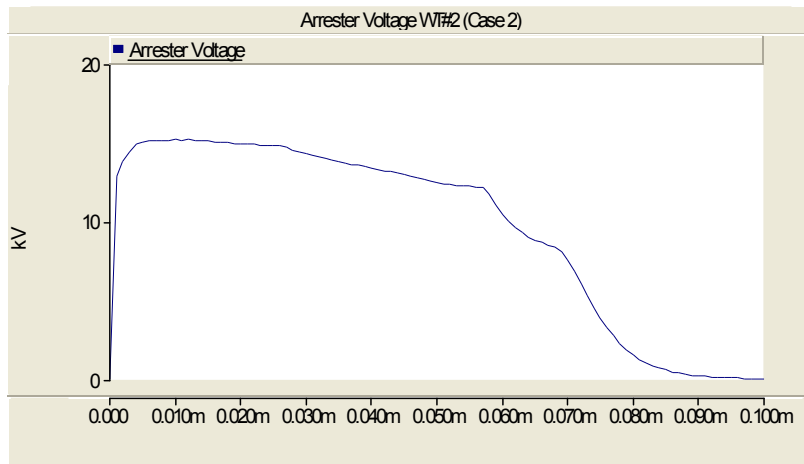
Σχήμα 8.20: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο του μετασχηματιστή χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης για τα αλεξικέραυνα των δύο ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή στην περίπτωση της ύπαρξης κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης (case2).

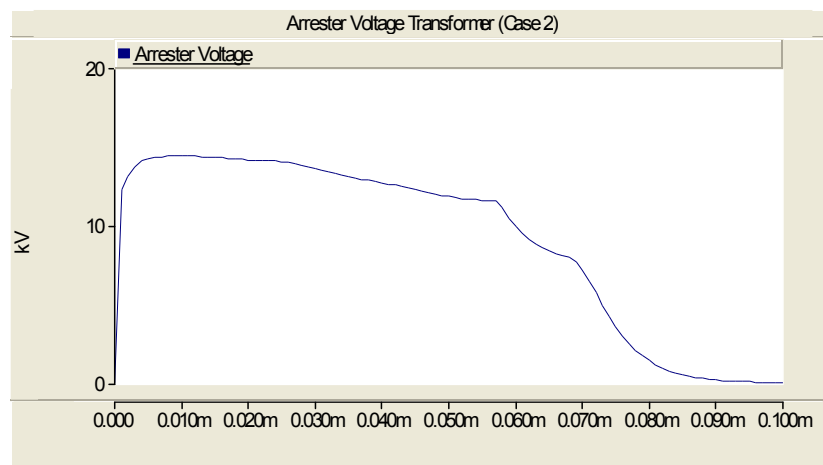
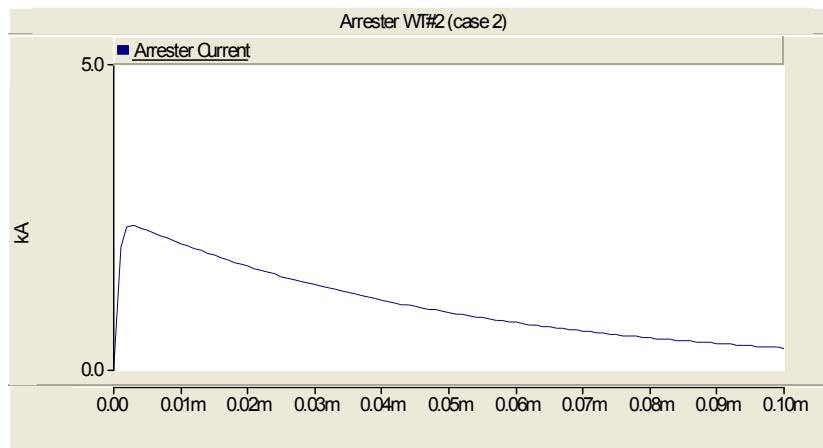


Σχήμα 8.21: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ1 με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω





Σχήμα 8.22: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέρανο της A/Γ2 με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω

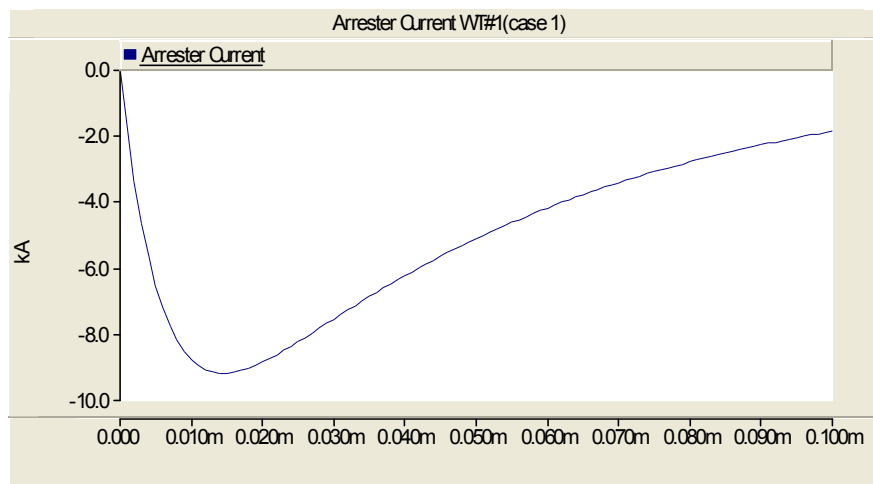


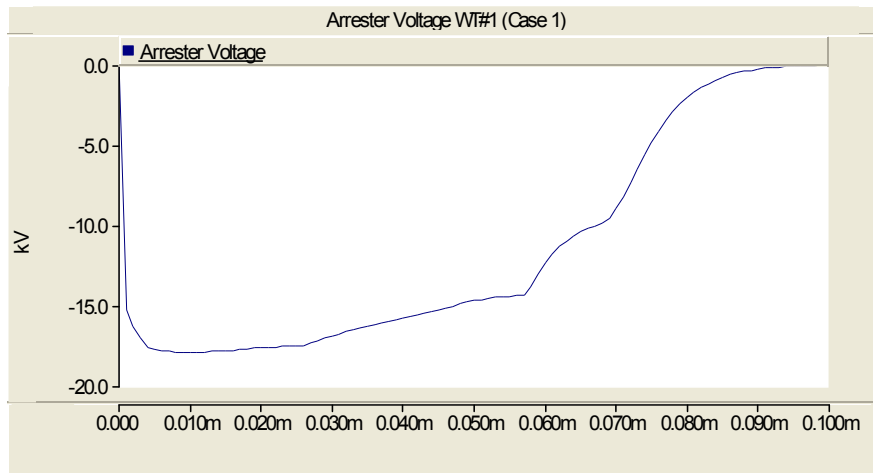
Σχήμα 8.23: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέρανο του μετασχηματιστή με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω

Οι αρνητικές κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης για την A/Γ1 είναι αποτέλεσμα της ανάστροφης αγωγής του αλεξικέραυνου. Το φαινόμενο της ανάστροφης αγωγής του αλεξικέραυνου προκαλείται από την διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος από τον πύργο της ανεμογεννήτριας προς το ηλεκτρικό δίκτυο σε συνδυασμό με την ύπαρξη αντίσταση γείωσης. Στην συνέχεια παρατηρούμε ότι η συμβολή του αγωγού γείωσης στην παρεμπόδιση της ροής της υπέρτασης από την ανεμογεννήτρια που έπληξε ο κεραυνός (A/Γ1) προς την επόμενη (A/Γ2) και τον μετασχηματιστή είναι αρκετά σημαντική, καθώς η μέγιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τα αλεξικέραυνα μειώνεται σχεδόν κατά 1/3 .

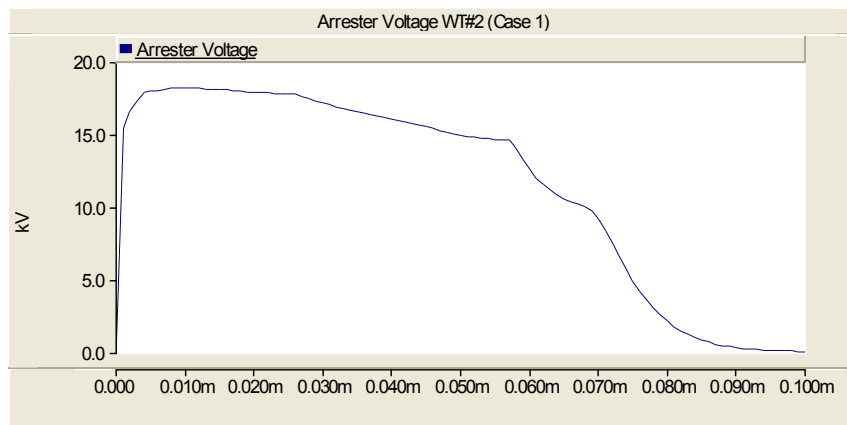
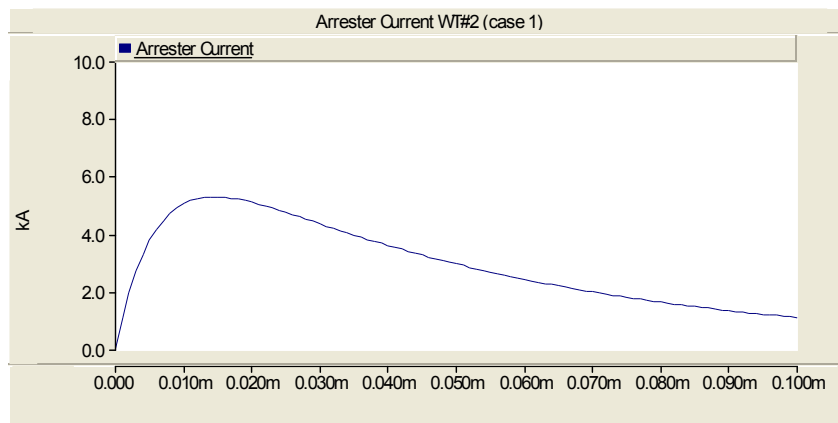
8.11.2.Μεταβολές στην τιμή της αντίστασης γείωσης

Η επόμενη ανάλυση αφορά στην επιρροή της αντίστασης γείωσης στην απορροφούμενη από το αλεξικέραυνο ενέργεια [9]. Στα προηγούμενα σχήματα, η αντίσταση γείωσης, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ήταν 10Ω. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 8.24,8.25 και 8.26) παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης για τα αλεξικέραυνα των δύο ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή στις περιπτώσεις της μη ύπαρξης (case1) και της ύπαρξης (case2) κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης με αντίσταση γείωσης αυτή την φορά ίση με 20Ω.

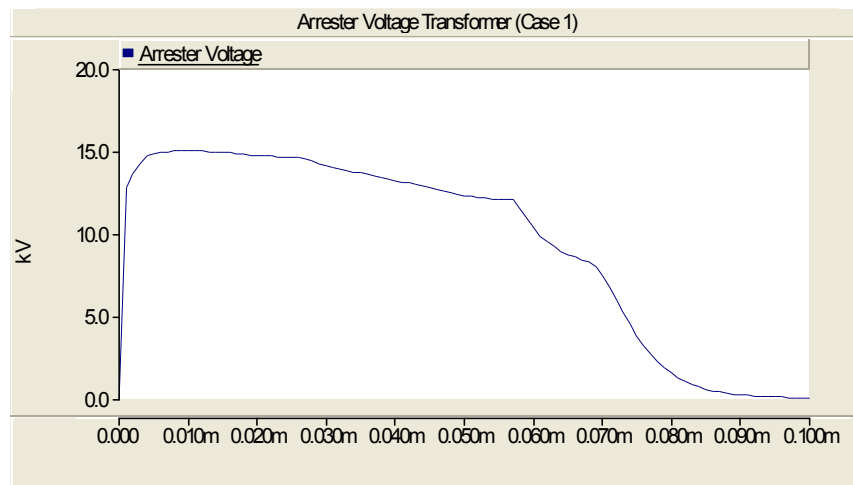
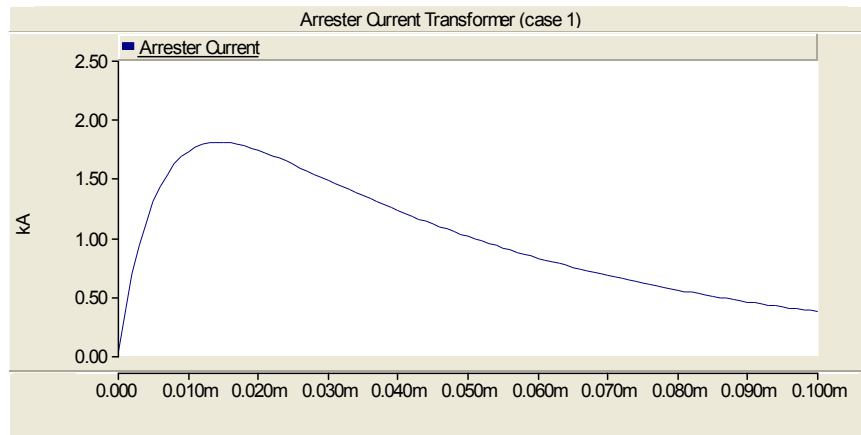




Σχήμα 8.24: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ1 χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω

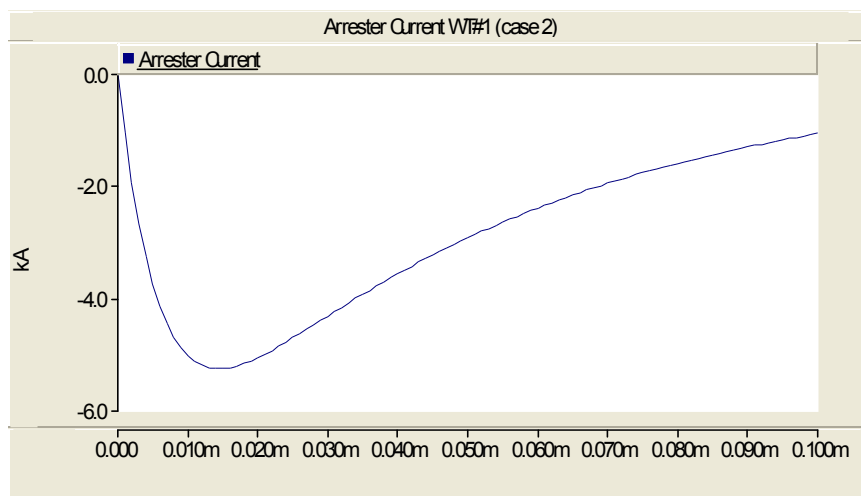


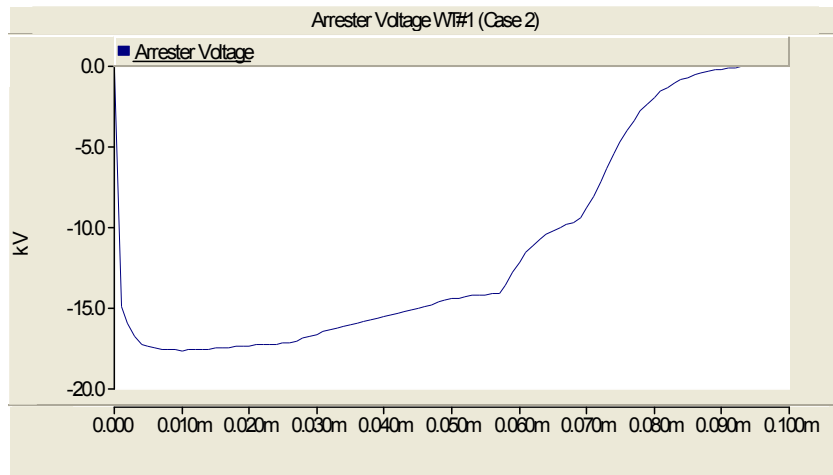
Σχήμα 8.25: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ2 χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω



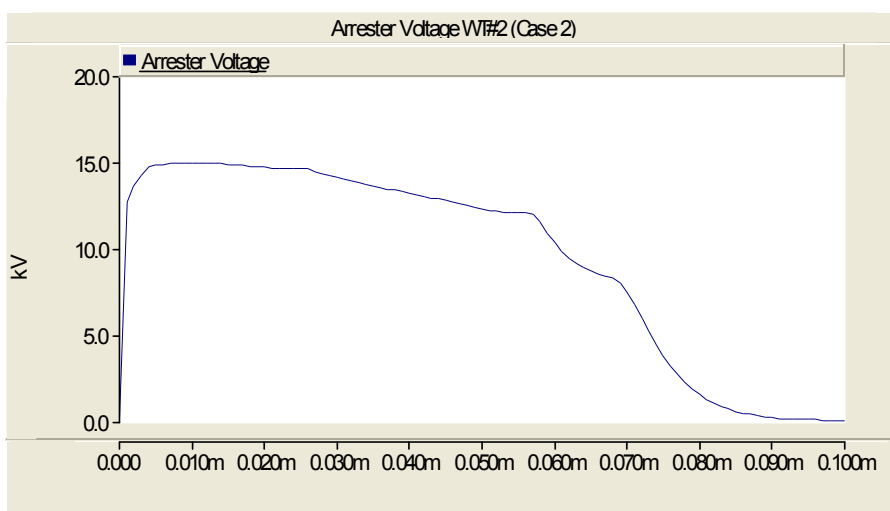
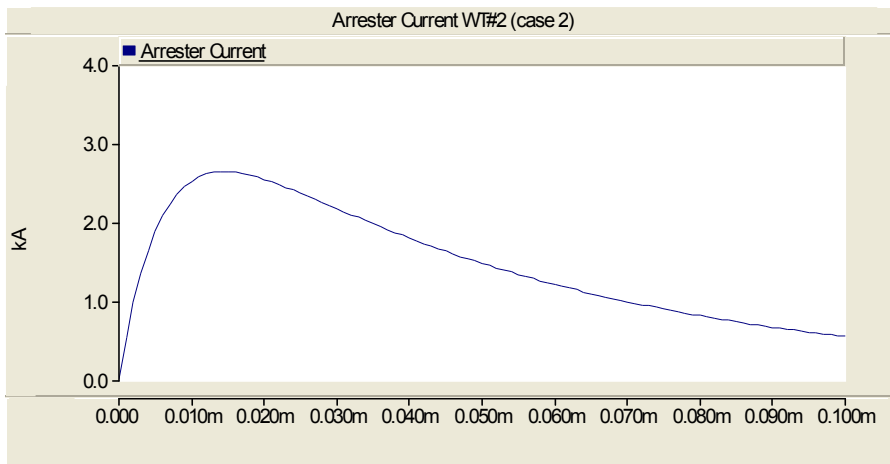
Σχήμα 8.26: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο του μετασχηματιστή χωρίς την ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω

Ακολουθούν οι κυματομορφές με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης (case2).

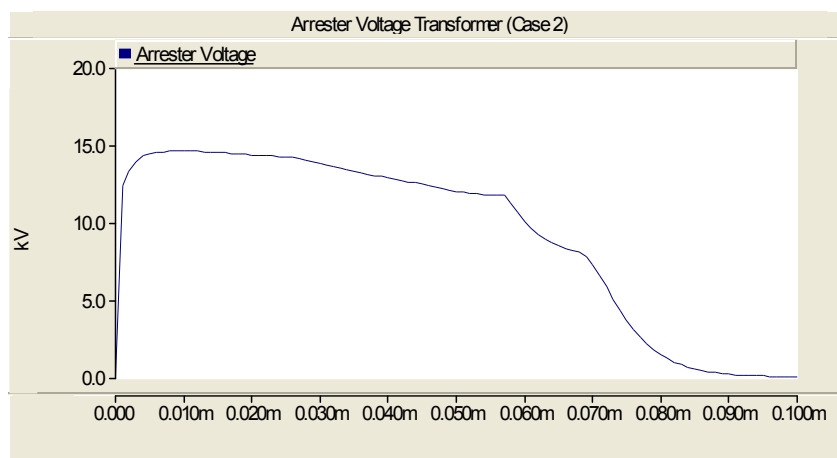
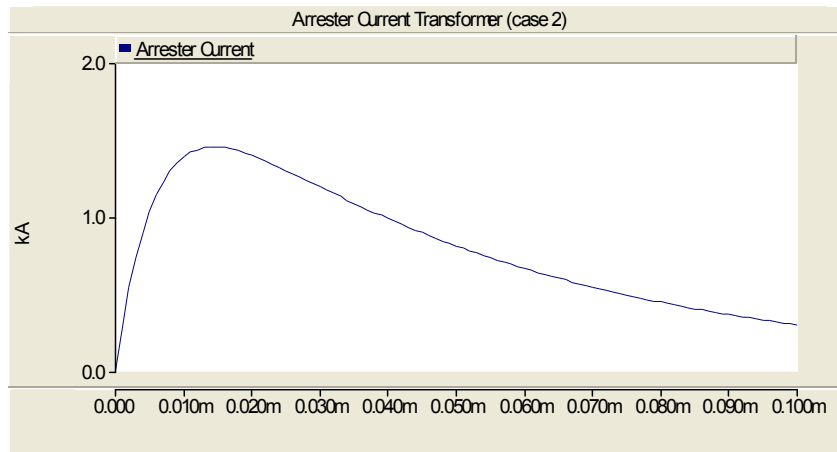




Σχήμα 8.27: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ1 με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω



Σχήμα 8.28: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο της Α/Γ2 με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω



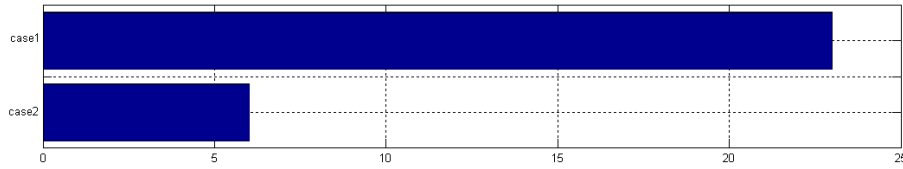
Σχήμα 8.29: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για το αλεξικέραυνο του μετασχηματιστή με ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω

Γίνεται φανερό από τα παραπάνω σχήματα, καθώς επίσης και από τον πίνακα και τα διαγράμματα που ακολουθούν, ότι όσο μικραίνει η αντίσταση γείωσης, τόσο μειώνεται και η απορροφούμενη από το αλεξικέραυνο ενέργεια.

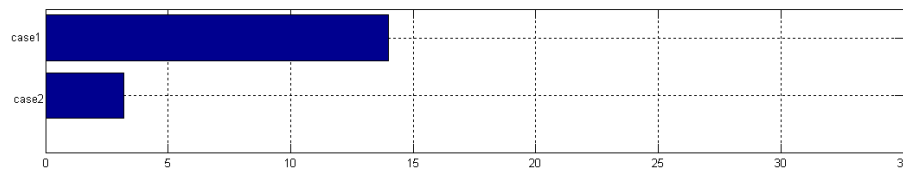
| | A/Γ1. | A/Γ2. | ΜΣ |
|----------------------|--------------|--------------|-----------|
| 10 Ω – Case 1 | 23 kJ | 14 kJ | 2,5 kJ |
| 10 Ω – Case 2 | 6 kJ | 3,2 kJ | 1,4 kJ |
| 20 Ω – Case 1 | 30 kJ | 18 kJ | 3,9 kJ |
| 20 Ω – Case 2 | 7,8 kJ | 4,5 kJ | 2,1 kJ |

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

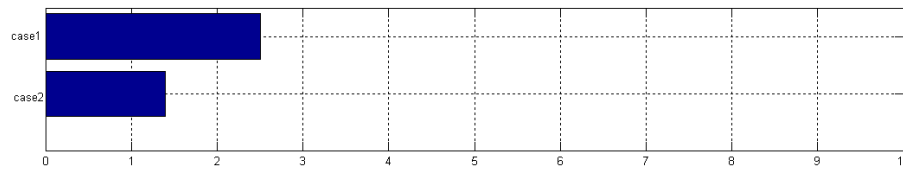
Παρακάτω έχουμε τα συγκριτικά διαγράμματα ενέργειας αλεξικέραυνων στις περιπτώσεις μη ύπαρξης και ύπαρξης κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 10Ω .



Σχήμα 8.30: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου $A/G1$ για αντίσταση γείωσης 10Ω

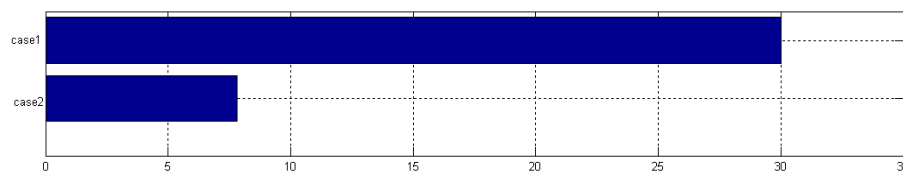


Σχήμα 8.31: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου $A/G2$ για αντίσταση γείωσης 10Ω

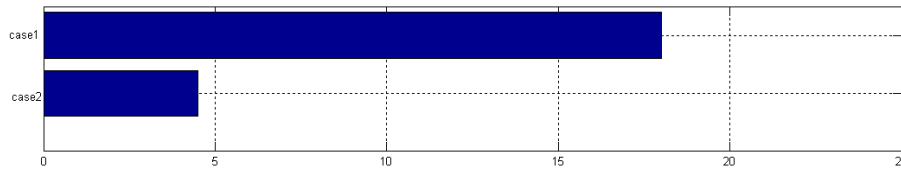


Σχήμα 8.32: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου $M\Sigma$ για αντίσταση γείωσης 10Ω

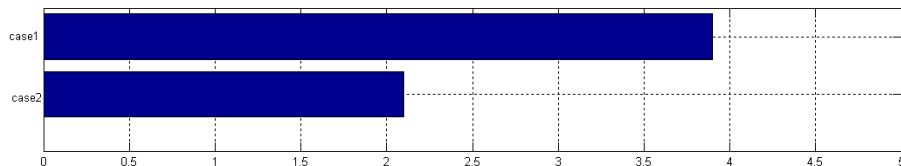
Ακολουθούν, επίσης, τα συγκριτικά διαγράμματα ενέργειας αλεξικέραυνων στις περιπτώσεις μη ύπαρξης και ύπαρξης κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης για αντίσταση γείωσης 20Ω .



Σχήμα 8.33: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου $A/G1$ για αντίσταση γείωσης 20Ω



Σχήμα 8.34: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου A/G2 για αντίσταση γείωσης 20Ω



Σχήμα 8.35: Απορροφούμενη ενέργεια αλεξικέραυνου MΣ για αντίσταση γείωσης 20Ω

Το φαινόμενο της μείωσης της απορροφούμενης ενέργειας από το αλεξικέραυνο ως συνέπεια της μείωσης της αντίστασης γείωσης οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς μεταβάλλουμε την αντίσταση γείωσης μεταβάλλεται και το ρεύμα που διαρρέει το αλεξικέραυνο. Η επίτευξη συστήματος γείωσης με χαμηλή αντίσταση εξασφαλίζει τη διοχέτευση του κεραυνού προς της γη. Αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς το κεραυνικό ρεύμα συναντώντας μεγάλη αντίσταση γείωσης, επιλέγει την κατεύθυνση προς το αλεξικέραυνο όπου η συνολική αντίσταση είναι μικρότερη. Όσο μικραίνουμε την αντίσταση γείωσης, τόσο το φαινόμενο μεταβάλλεται και όλο και μικρότερο ποσοστό του ρεύματος κατευθύνεται προς το αλεξικέραυνο. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου, δηλαδή αύξηση του ρεύματος που ρέει από το αλεξικέραυνο και της τάσης στα άκρα του συνεπάγεται αύξηση και της απορροφούμενης από αυτό ενέργειας.

8.12.Η επόμενη μέρα

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, κατανοούμε την συμβολή της κοινής σύνδεσης στην γείωση των ανεμογεννητριών και του μετασχηματιστή του αιολικού πάρκου. Επιπλέον, γίνεται φανερή η επίδραση της αντίστασης γείωσης στην συμπεριφορά του αλεξικέραυνο. Η ύπαρξη κοινής σύνδεσης στο σύστημα γείωσης και μικρές τιμές της αντίστασης γείωσης μειώνουν την απορροφούμενη από το αλεξικέραυνο ενέργεια και επομένως, μειώνουν την πιθανότητα ανάστροφης αγωγής του, που θα είχε ως αποτέλεσμα να περάσει η υπέρταση στο δίκτυο.

Το μοντέλο του αιολικού πάρκου που έχει χρησιμοποιηθεί δεν είναι το ιδανικό, καθώς περιλαμβάνει δύο μόνο ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, με την ίδια ακριβώς διαδικασία είναι δυνατόν να γίνει πλήρης ανάλυση του φαινομένου για πραγματικό αιολικό πάρκο, έχοντας πραγματικά στοιχεία, έτσι ώστε να αποφασιστεί η βέλτιστη επιλογή των χαρακτηριστικών των αλεξικέραυνων σε συνάρτηση βέβαια με το σύστημα γείωσης.

8.13.Βιβλιογραφία

[1] www.eletaen.gr

[2] www.cres.gr

[3] www.ewea.org

[4] Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου, «Σύνδεση Εγκαταστάσεων Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής», Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003

[5] Ν. Χατζηαργυρίου, Μ. Λορέντζου, «Γειώσεις Αιολικών Πάρκων», Σεμινάριο «Γειώσεις Δικτύων και Εγκαταστάσεων», ΤΕΕ, Οκτώβριος 1997

[6] Y. Yasuda and T. Funabashi, «Analysis on Back-Flow Surge in Wind Farms», Ιούνιος 2007

[7] Y. Yasuda and T. Funabashi, «Surge Analysis on Wind Farm at Winter Lightning Stroke», 28th International Conference on Lightning Protection

[8] N. Umo, H. Kobayashi, Y. Yasuda and T. Funabashi, «Surge Analysis on Wind Farm When Winter Lightning Strikes», IEEE Transactions on Energy Conversion, Μάρτιος 2008

[9] Lightning Protection Guide, «Lightning and Surge Protection of Multi-megawatt Wind Turbines», Τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας DEHN

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

```
close all;clear all;clc;

Emax = 400e3 ;
Iin = 10e3 ;
Tmin = 20e-6 ;
Tmax = 1000e-6 ;
dI = 10e3 ;
dT = 20e-6 ;
Ip = Iin ;

d = 2.2 ;
yg = 23.75 ;
yt = 21.14 ;
b = 0.36+0.168*log10(43-yg) ;

Io = Iin ;
Ta = Tmin ;
Imax = 300e3 ;

I50 = 24e3;
T50 = 30e-6;
nc = 1.89;
nt = 1.82;

Pbx = 0;
Pby = 0;

for T = Tmin:Tmax

    for Ip = Ip:Imax

        T = Ta ;

        Ip = Io
        SurgeEqn='(Ip*(u/10e-6)^7*exp(-u/T))/((1+u/T)*
                exp(-2e-6/(T*(7*2e-6/T)^(1/8))))';
        set_param([bdroot,'/Fcn'],'Expression',SurgeEqn);
        sim('C:\Users\Anastasia\Desktop\runsim\transmissionlines2.mdl');

        Ea = max(Ea0)

        if Ea > Emax

            Isg = Ip

            c=8*Isg^0.65;

            K = solve ('x^2+(y-yg)^2=r^2, (x-d)^2+(y-yt)^2=r^2');
            L = solve ('x^2+(y-yt)^2=r^2,y=b*r');
```

```

Xc = abs(K.x);
Xr = abs(L.x) + d;
display(Xc);
display(Xr);

hg=Xc/Xr;
hl=1-Xc/Xr;
display(hg);
display(hl);

fIp=nc*(Isg^(nc-1))/(I50^nc*(1+Isg^nc/I50^nc)^2);
gTt=nt*(T^(nt-1))/(T50^nt*(1+T^nt/T50^nt)^2);
display(fIp);
display(gTt);

Pbi = Pbx + fIp*hl;
Pbx = Pbi;
Pb = Pby + Pbi*gTt;
Pby = Pb;

    if T < Tmax
        Ta = T+dT
        Io = Iin;
    else
        display(Pb);
        return
    end

else Io = Ip+dI
continue
end

end

end

display (Pb)

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

```
% PSA - SYSTEM WITHOUT ADAPTIVE LEARNING RATE

clear all;
close all;
% Loading data
load psa.mat;

%2
% DataIn
input=DataIn;
sydim1=size(input,1); % arithmos protypwn
dim2=size(input,2); % xarakteristika protypwn
trainpatterns=dim1;

input1=zeros(dim2,2);

minall=min(DataIn);
maxall=max(DataIn);

for k=1:1:dim2
    input1(k,1)=minall(k);
    input1(k,2)=maxall(k);
end %for min-max timwn protypwn

%kataskevi neurwnikou
net = newff(input1,[7 size(OutClass,2)],{'tansig'
'purelin'},'trainlm','learngdm');
net.trainParam.epochs = 300;
net.trainParam.show = NaN;
net=init(net);

[net,tr,Y,E]=train(net,input',OutClass');
E

save ('PSA-NN.mat');

% RL SYSTEM WITH ADAPTION LEARNING RATE
% MODIFIED FOR PSA

% Loading data
load psa.mat

Trials=500;
X=5;
initLR=0.01;

Epochs=20;
alpha=0.8; % Agent's Learning Rate
```

```

gamma=0.65;           % Discount Factor gamma
sigma=1.25;          % LR Deviation
exploration=0.9;     % Exploration factor (initial value)
all_actions=4;       % 4 actions for LR : increase high, increase low,
decrease low, decrease high
all_states=5;        % 5 states : error decreasing much, error
decreasing, error stable, error increasing, error increasing much
goal=0;              % error = zero

% Prepare Data
input=DataIn;
dim1=size(input,1); % arithmos protypwn
dim2=size(input,2); % xarakteristika protypwn

input1=zeros(dim2,2);

minall=min(DataIn);
maxall=max(DataIn);

for k=1:1:dim2
    input1(k,1)=minall(k);
    input1(k,2)=maxall(k);
end %for min-max timwn protypwn
Out=zeros(size(OutClass));

% Set exploration factor which will decay through time
exf=exploration;

% initialize Q(states,actions) with an arbitrary value
Q=ones(all_states,all_actions);
for i=1:all_states
    for j=1:all_actions
        Q(i,j)=Q(i,j)*rand;
    end
end
[v1,P]=max(Q');
%*****
% Begin Trials
%*****
for n=1:Trials
    if (mod(n, 50)==0)
        Tr=n
        BestPolicy = P(n-1,:);
        Q
    end
    %kataskevi neurwnnikou
    net = newff(input1,[7 size(OutClass,2)],{'tansig'
'tansig'},'learnqdm');
    net.trainFcn='trainqdx';
    net.trainParam.epochs = 1;
    net.trainParam.goal = 0;
    net.trainParam.show = NaN;

%Initialize parameters
lr=initLR;
net=init(net);
t=1; %observe state
ActionOrder=randperm(all_actions);
a=ActionOrder(1);

```



```

% Start Environment
while (t <= Epochs) %&& (Error>0) % batch
    % Observe State

    net.trainParam.lr=lr;
    lr;
    % Select action and compute Q(n-1)
    for i=1:1:40 % gia ola ta protypa

        [net,tr,Y,E] = train(net,input(i,:)','OutClass(i,:)');

        Out(i,:)=Y';

        ER(i)=mse(E);

    end %if protypwn

    ER1=mean(ER(:));
    Error(t)=ER1;
    if t==1
        DE=Error(t);
        percent=1;
        s=3;
    else
        DE=Error(t) - Error(t - 1);
        percent=100*abs(DE)/Error(t-1);
    end %if sfalmatos

    %YPOSYSTHMA EKPAIDEUSHS RYTHMOU MATHISIS
    if DE==0 % Error stable
        REINF=0;
        s_new=3;
    elseif (DE<0 & percent>X) % Error reduced much
        s_new=1;
        REINF=30*abs(DE);
    elseif DE<0 % Error reduced
        s_new=2;
        REINF=20*abs(DE);
    elseif (DE>0 & percent>X) % Error increased much
        s_new=5;
        REINF=-30*abs(DE);
    elseif DE>0 % Error increased
        s_new=4;
        REINF=-20*abs(DE);
    end %if

    % update Q

    Q(s,a)=Q(s,a) + alpha*(REINF + gamma*max(Q(s_new,:))-Q(s,a));

    % Determine best action
    %***** Exploitation - Exploration *****
    if rand<=exf
        BestAction=randperm(all_actions);
    else
        [MaxVal, BestAction] = max(Q(s,:));

```

```

end

cur_action=BestAction(1);
pre_lr=net.trainParam.lr;
lr=0;

% Adapt learning rate
switch (cur_action)
    case 1, lr=pre_lr*sigma^2; % increase lr much
    case 2, lr=pre_lr*sigma; % increase lr little
    case 3, lr=pre_lr/sigma; % decrease lr little
    case 4, lr=pre_lr/(sigma^2); % decrease lr much
end %switch
% if lr>1 lr=1; end
LRATE(t)=lr;
a=cur_action;
t=t+1;
s=s_new;

end % of States

TrialError(n) = 100*(Error(1)-Error(t-1))/Error(1);
TrialLR(n) = mean(LRATE);
Q;
% Determine Best Policy P(n)
[QValue, P(n,:)] = max(Q');

% Reduce alpha
alpha=alpha - (alpha/Trials);

% Reduce exploration factor
if exf>0.01
    exf = exf-(3*exploration/Trials);
end

end % of Trials
Q
BestPolicy = P(Trials,:);
disp('1 (blue)=increase much, 2 (green)= increase little, 3 (red)=
decrease little, 4 (cyan)= decrease much')
lr
exf;
% Error(iter)
figure;plot(TrialError);
figure;plot(Error);
figure;plot(LRATE);
figure;plot(Q);
save('LR-PSA.mat');
clear all;
close all;
clc;

```