



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα

Νικόλαος Κ. Γουβάλας

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αθήνα, Ιούνιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

175

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα

Νικόλαος Κ. Γουβάλας

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουνίου 2012

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

.....
Γεώργιος Ν. Κορρές
Αν. Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....

Νικόλαος Κ. Γουβάλας

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

Copyright © Νικόλαος Κ. Γουβάλας, 2012

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 το συγγραφέα.

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

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract	ii
Πρόλογος	iii
Κεφάλαιο 1 Γενική Θεώρηση και Υπολογισμός Βραχυκυκλωμάτων.....	1
1.1 Είδη Βραχυκυκλωμάτων	1
1.2 Μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης.....	2
1.3 Αναλυτικός υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος.....	7
1.3.1 Μετασηματισμός Συμμετρικών Συνιστωσών	7
1.3.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη.....	8
1.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη	9
1.3.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη.....	11
1.3.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη.....	13
1.4 Τυποποίηση της διαδικασίας υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος	16
Κεφάλαιο 2 Περιγραφή του Προτύπου IEC 60909.....	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Όροι και Ορισμοί	20
2.3 Χρονική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης	22
2.4 Μέθοδος Ισοδύναμης Πηγής Τάσης	23
2.5 Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Στοιχείων του Δικτύου	24
2.5.1 Γενικά.....	24
2.5.2 Ισοδύναμο Δίκτυο Τροφοδότησης.....	25
2.5.3 Μετασηματιστές Ισχύος.....	26
2.5.4 Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς - Υπόγεια Καλώδια	27
2.5.5 Σύγχρονες Γεννήτριες	27
2.5.6 Ασύγχρονες Μηχανές	29
2.5.7 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος.....	30
2.5.8 Χωρητικότητες και Μη στρεφόμενα Φορτία.....	31
2.6 Αναλυτικός Υπολογισμός Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης	31
2.6.1 Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'').....	31
2.6.1.1 Τριφασικό σφάλμα	31
2.6.1.2 Μονοφασικό σφάλμα προς γη.....	32

2.6.1.3 Διφασικό σφάλμα προς γη.....	32
2.6.1.4 Διφασικό σφάλμα χωρίς γη	33
2.6.2 Μέγιστη τιμή Ρεύματος Βραχυκύκλωσης (I_p)	35
2.6.3 Ρεύμα Διάσπασης (I_b).....	35
2.6.4 Ρεύμα Μόνιμης Κατάστασης (I_k).....	37
Κεφάλαιο 3 Περιγραφή του Προτύπου ANSI C 37.010	38
3.1 Γενικά.....	38
3.2 Απλοποιημένη Μέθοδος E / X	38
3.2.1 Μοντελοποίηση της AC / DC συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος.....	38
3.2.2 Χαρακτηριστικές τιμές του ρεύματος σφάλματος.....	41
3.3 Συγκριτική αντιπαράθεση Προτύπων IEC 60909 και ANSI C 37.010.....	43
Κεφάλαιο 4 Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης	45
4.1 Βασική Ορολογία.....	45
4.2 Ειδική αντίσταση του εδάφους.....	50
4.2.1 Ορισμός ειδικής αντίστασης.....	50
4.2.2 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους	51
4.2.3 Καθορισμός της δομής του εδάφους.....	52
4.3 Καθορισμός ορίων ασφαλείας	53
4.3.1 Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα	53
4.3.2 Αντίσταση ανθρώπινου σώματος	56
4.3.3 Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος	57
4.3.4 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφανείας	61
4.3.5 Κριτήρια για την βηματική τάση και την τάση επαφής.....	61
4.4 Βασικές παράμετροι σχεδίασης συστήματος γείωσης.....	63
4.4.1 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος (I_G)	63
4.4.2 Προσδιορισμός χειρότερου τύπου σφάλματος	64
4.4.3 Προσδιορισμός συντελεστή καταμερισμού (S_f).....	65
4.4.4 Προσδιορισμός συντελεστή εξασθένησης (D_f).....	65
4.4.5 Διαδικασία Σχεδίασης Συστήματος Γείωσης.....	66
Κεφάλαιο 5 Περιγραφή του λογισμικού πακέτου PSAF.....	68
5.1 Αρχεία PSAF	68
5.2 Γραφικό περιβάλλον (PSAF GUI)	69
5.3 Περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης σφάλματος.....	70

5.3.1 Ανάλυση Σφάλματος κατά IEC (CYMFAULT IEC)	70
5.3.2 Ανάλυση Σφάλματος κατά ANSI (CYMFAULT ANSI)	73
5.3.3 Συμβατική Ανάλυση Σφάλματος (Conventional Fault Analysis).....	74
Κεφάλαιο 6 Περιγραφή του λογισμικού πακέτου CYMGrd	77
6.1 Γενικά	77
6.2 Ανάλυση Εδάφους (Soil Analysis Module)	78
6.3 Διαστασιολόγηση Ηλεκτροδίων (Electrode Sizing Module)	80
6.4 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module)	81
6.5 Εξαγωγή Γραφημάτων (Plotting Module).....	82
Κεφάλαιο 7 Υπολογιστική προσομοίωση σφαλμάτων σε δίκτυο MT με κατανεμημένη παραγωγή (Αιολικό Πάρκο)	86
Κεφάλαιο 8 Υπολογιστική προσομοίωση απόκρισης συστήματος γείωσης Αιολικού Πάρκου υπό συνθήκες σφάλματος	99
8.1 Γενικά	99
8.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου.....	99
8.3 Κατασκευή συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου	100
8.4 Προσομοίωση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου	102
8.4.1 Καθορισμός Μέγιστης Αναμενόμενης Τιμής Ρεύματος Σφάλματος.....	102
8.4.2 Μέτρηση Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους	102
8.4.3 Επιλογή Μοντέλου Προσέγγισης του Εδάφους.....	104
8.4.4 Υπολογισμός Μέγιστων Επιτρεπόμενων Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής.....	107
8.4.5 Σχεδίαση Πλέγματος Γείωσης Ανεμογεννήτριας και Κτιρίου Ελέγχου.....	108
8.4.6 Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης.....	110
8.4.7 Αναλυτικός Υπολογισμός Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής	112
8.5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων - Σχολιασμός.....	113
8.5.1 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) του αιολικού πάρκου.....	113
8.5.2 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στην παρεχόμενη ασφάλεια του αιολικού πάρκου	124
Κεφάλαιο 9 Ανακεφαλαίωση	172
Βιβλιογραφία	173

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της υπολογιστικής επίδρασης του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα και κατεπέκταση στην παρεχόμενη ασφάλεια αυτών. Αρχικά, γίνεται θεωρητική προσέγγιση του τρόπου εκδήλωσης και υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος σε ηλεκτρικά δίκτυα. Στην συνέχεια, ακολουθεί ανασκόπηση των επικρατέστερων τυποποιημένων μεθόδων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ύστερα από την οποία επιλέγεται και περιγράφεται αναλυτικά το διεθνές Πρότυπο IEC 60909 και το αμερικάνικο Πρότυπο ANSI/IEEE C 37.010. Στην προσπάθεια μιας ρεαλιστικής προσέγγισης του θέματος, μοντελοποιείται ένα υπαρκτό αιολικό πάρκο και προσομοιώνεται η λειτουργία του υπό συνθήκες σφάλματος, με χρήση του λογισμικού PSAF. Τέλος, αφού σχεδιαστεί πλέγμα γείωσης για τις ανεμογεννήτριες και το κτίριο ελέγχου του αιολικού πάρκου, προσομοιώνεται η απόκριση του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης αυτού, υπό συνθήκες σφάλματος, και πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη ασφάλειας έναντι των αναπτυσσόμενων τάσεων, κάνοντας χρήση του λογισμικού CYMGrd.

Λέξεις Κλειδιά

Υπολογισμός ρεύματος σφάλματος, Ενεργό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος, Διασυνδεδεμένο σύστημα γείωσης, Γείωση ανεμογεννήτριας, Βηματική τάση, Τάση επαφής, IEC 60909, ANSI/IEEE C 37.010, IEEE Std 80-2000

Abstract

The aim of this diploma thesis is to study the way that the short circuit current calculation procedure affects the developed voltages (step and touch) in wind farms and therefore the provided safety. Initially, a theoretical approach is given in regard to the way of event and calculation of fault current in electrical networks. Then it follows, a review of the predominant standardized fault current calculation methods after which the international standard IEC 60909 and the american Standard ANSI/IEEE C 37.010 are selected and described in detail. In the effort of a realistic approach of the subject, an existing wind farm is being modeled and its operation is being simulated under faulted conditions, with use of the software PSAF. Lastly, after designing ground grids for the wind turbines and the control building, simulations of wind farm's interconnected grounding system response is carried out, under faulted conditions, whereas a parametric safety study is hold, with the aid of CYMGrd software.

Key words

Fault current calculation, Rms symmetrical fault current, Interconnected grounding system, Windturbine grounding, Step voltage, Touch voltage, IEC 60909, ANSI/IEEE C 37.010, IEEE Std 80-2000

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη της επίδρασης του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα. Στα πλαίσια ανάπτυξης του θέματος, προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός υφιστάμενου δικτύου Μέσης Τάσης (MT) με καταναεμημένη παραγωγή (αιολικό πάρκο) υπό συνθήκες σφάλματος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σφαλμάτων χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια για την προσομοίωση της απόκρισης του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου (Α/Π). Ειδικότερα, η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια :

Κεφάλαιο 1 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται θεωρητική προσέγγιση του τρόπου εκδήλωσης και υπολογισμού του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε ηλεκτρικά δίκτυα. Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων μεθόδων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος επιλέγονται το διεθνές Πρότυπο IEC 60909 και το αμερικάνικο ANSI C 37.010, ως τα πλέον χρησιμοποιούμενα.

Κεφάλαιο 2 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της μεθόδου, στην οποία στηρίζεται το Πρότυπο IEC, για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος παρουσιάζοντας τις παραδοχές και τις βασικές τεχνικές μοντελοποίησης που αυτή υιοθετεί.

Κεφάλαιο 3 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του Προτύπου ANSI C 37.010 αναλύοντας την υπολογιστική μέθοδο που αυτό υιοθετεί ενώ ακολουθεί συγκριτική αντιπαραβολή των δύο προτύπων ως προς τις χαρακτηριστικές τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Κεφάλαιο 4 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν την σχεδίαση ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000.

Κεφάλαιο 5 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης σφάλματος με χρήση του λογισμικού πακέτου PSAF.

Κεφάλαιο 6 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης και προσομοίωσης ενός συστήματος γείωσης, με χρήση του λογισμικού πακέτου CYMGrd.

Κεφάλαιο 7 : Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται η λειτουργία υφιστάμενου αιολικού πάρκου υπό συνθήκες σφάλματος, με χρήση του λογισμικού PSAF, και ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 8 : Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα και κατεπέκταση στην παρεχόμενη ασφάλεια αυτών. Για τον λόγο

αυτό, προσομοιώνεται η απόκριση του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης ενός υπαρκτού αιολικού πάρκου (βλ. Κεφάλαιο 7) υπό συνθήκες σφάλματος, με τρεις διαφορετικούς τρόπους, κάνοντας χρήση του λογισμικού CYMGrd. Στην συνέχεια, ακολουθεί παραμετρική μελέτη ασφάλειας του αιολικού πάρκου έναντι των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής), με τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθειά τους, όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την αμέριστη συμπαράστασή του και το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό και λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την συνεργασία, την καθοδήγηση και την βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τον κ. Γεώργιο Α. Μάνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και διευθυντή ηλεκτρολογικών έργων στην Ελληνική Τεχνοδομική Ενεργειακή Α.Ε για την παροχή όλων των απαραίτητων δεδομένων για την προσομοίωση του αιολικού πάρκου του Δ.Μολάων καθώς και για το φιλικό κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή, την εμπιστοσύνη και το κλίμα ασφάλειας που μου παρέχουν, χωρίς τα οποία η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Κεφάλαιο 1

Γενική Θεώρηση και Υπολογισμός Βραχυκυκλωμάτων

1.1 Είδη Βραχυκυκλωμάτων

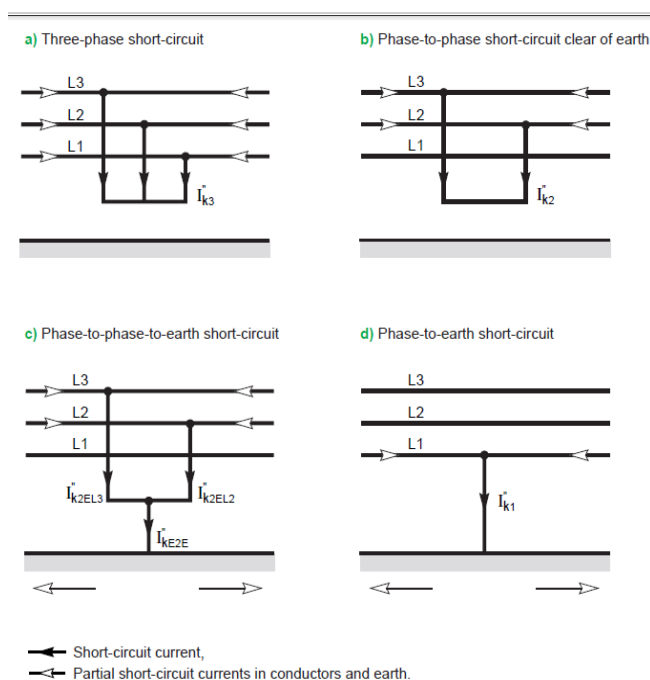
Τα βραχυκυκλώματα (β/κ), με βάση την φόρτιση του δικτύου κατά την εκδήλωση αυτών, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες : α) τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα και β) τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα. Με τον όρο συμμετρικά βραχυκυκλώματα χαρακτηρίζονται οι ανώμαλες μεταβατικές καταστάσεις, στις οποίες περιέχεται το σύστημα όταν λόγω βλάβης σε κάποιο σημείο έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και οι τρεις φάσεις. Τα τριφασικά βραχυκυκλώματα μπορούν να αναλυθούν με την βοήθεια ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων, με την παραδοχή ότι το τριφασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε) είναι συμμετρικό και τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα τάσεων (ίσα μέτρα /φασική μετάθεση 120°).

Πλην των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν και τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης και κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες :

α) Μονοφασικά βραχυκυκλώματα (φάση – γης)

β) Διφασικά βραχυκυκλώματα χωρίς γη

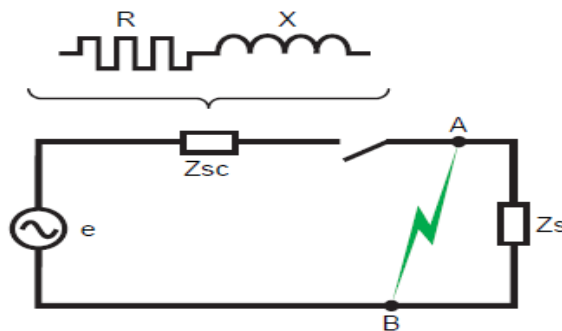
γ) Διφασικά βραχυκυκλώματα με γη



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα βασικών τύπων βραχυκυκλωμάτων [1]

1.2 Μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Για την μελέτη του τρόπου εκδήλωσης και της χρονικής συμπεριφοράς του ρεύματος βραχυκύκλωσης θεωρείται η απλοποιημένη αναπαράσταση δικτύου του σχήματος 1.2. Το απλοποιημένο αυτό δίκτυο αποτελείται από μια σταθερή πηγή εναλασσόμενης τάσης, ένα διακόπτη, την σύνθετη αντίσταση φορτίου \tilde{Z}_s και την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ (ισοδύναμη Thevenin) \tilde{Z}_{sc} για τα ανάντη του διακόπτη. Κατά την ομαλή λειτουργία (κλειστός διακόπτης) στο κύκλωμα ρέει το σχεδιαστικό ρεύμα φορτίου I_s . Η αγώγιμη σύνδεση μεταξύ των σημείων A και B οδηγεί σε υψηλό ρεύμα σφάλματος I_{sc} το οποίο περιορίζεται μόνο από την αντίσταση \tilde{Z}_{sc} .



Σχήμα 1.2 Απλοποιημένο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα σφάλματος δικτύου [1]

Το ρεύμα σφάλματος I_{sc} έχει έντονα μεταβατικό χαρακτήρα που εξαρτάται από την αντίδραση X και την αντίσταση R της σύνθετης αντίστασης \tilde{Z}_{sc} και από την «ηλεκτρική» απόσταση της θέσης σφάλματος ως προς την γεννήτρια. Ανάλογα με την τοπικότητα της θέσης σφάλματος ως προς την πηγή ρεύματος βραχυκύκλωσης (γεννήτρια), διακρίνονται οι εξής κατηγορίες σφάλματος :

- Σφάλμα “μακριά” από την γεννήτρια

Η περίπτωση αυτή παρατηρείται όταν η σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και της θέσης σφάλματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν της γεννήτριας. Ο μεταβατικός χαρακτήρας του ρεύματος σφάλματος οφείλεται στην αφνίδια επιβολή της εναλασσόμενης τάσης e στο κύκλωμα R-L του σχήματος 1.2 και περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση :

$$i_{sc}(t)R + L \frac{di_{sc}(t)}{dt} = e(t) \Rightarrow$$
$$i_{sc}(t)R + L \frac{di_{sc}(t)}{dt} = E\sqrt{2} \sin(\omega t + a)$$

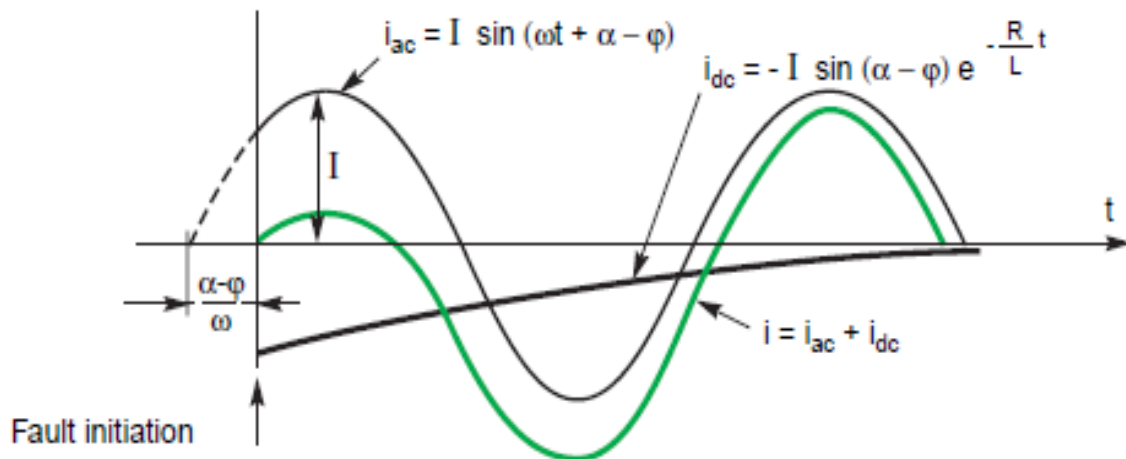
Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης δίνεται από την σχέση :

$$i_{sc}(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}$$

,όπου $I = \frac{E}{Z_{sc}}$, α : η γωνία που χαρακτηρίζει την διαφορά μεταξύ της εκδήλωσης του σφάλματος και του μηδενισμού της τάσεως και φ : η φασική γωνία της \tilde{Z}_{sc}

Από την τελευταία εξίσωση προκύπτει ότι για βραχυκύκλωμα “μακριά” από γεννήτρια το ρεύμα σφάλματος i_{sc} αποτελείται από δύο συνιστώσες (βλ.σχήμα 1.3):

- Την ac συνιστώσα ρεύματος (i_{ac}) η οποία είναι εναλασσόμενη και ημιτονοειδούς μορφής : $i_{ac} = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$
- Την dc συνιστώσα ρεύματος (i_{dc}) εκθετικής μορφής : $i_{dc} = -I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}$
 Η αρχική τιμή της i_{dc} συνιστώσας εξαρτάται από την γωνία α ενώ ο ρυθμός μείωσης αυτής από τον λόγο R/L .



Σχήμα 1.3 Γραφική απεικόνιση της αποσύνθεσης του ρεύματος σφάλματος στις συνιστώσες του για σφάλμα “μακριά” από γεννήτρια [1]

Ως προς την μορφή του ρεύματος i_{sc} για σφάλμα “μακριά” από γεννήτρια, διακρίνονται οι εξής δύο ακραίες περιπτώσεις :

1. $\alpha = \varphi \approx \pi/2$ (symmetrical – balanced)

Η μορφή του ρεύματος σφάλματος είναι ημιτονοειδής (συμμετρική) και δίνεται από

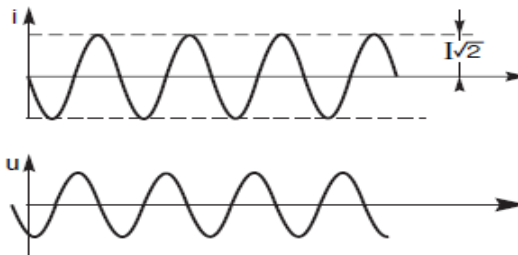
την σχέση :
$$i_{sc}(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} \sin(\omega t)$$

2. $\alpha = 0$ (asymmetrical – unbalanced)

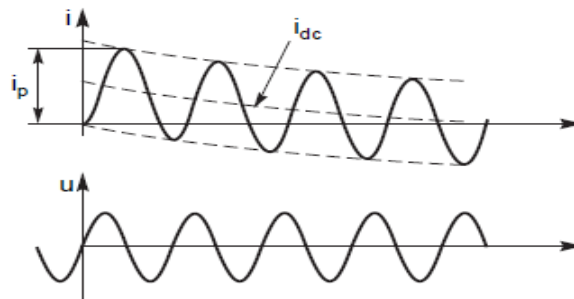
Η μορφή του ρεύματος σφάλματος είναι φθίνουσα ημιτονοειδής (ασύμμετρη) και

δίνεται από την σχέση :
$$i_{sc}(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} [\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t}]$$

a) Symmetrical



b) Asymmetrical



Σχήμα 1.4 Ρεύμα σφάλματος i_{sc} για βραχυκύκλωμα “μακριά” από γεννήτρια
(α) συμμετρική μορφή , (β) ασύμμετρη μορφή [1]

➤ Σφάλμα “κοντά” σε γεννήτρια

Παρατηρείται όταν η σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και της θέσης σφάλματος είναι μικρότερη από αυτήν της γεννήτριας. Το μεταβατικό περιεχόμενο του ρεύματος σφάλματος οφείλεται σε αυτήν την περίπτωση στην έντονη μεταβολή της αντίδρασης της γεννήτριας (κυρίαρχη αντίδραση). Η μεταβολή (αύξηση) της αντίδρασης της γεννήτριας με το χρόνο αναπτύσσεται σε τρία στάδια :

- Υπομεταβατική περίοδος ($10 \text{ ms} \leq t \leq 20 \text{ ms}$)
- Μεταβατική περίοδος ($20 \text{ ms} < t \leq 500 \text{ ms}$)
- Μόνιμης Κατάστασης περίοδος ($t > 500 \text{ ms}$)

Ακολουθούν τυπικές τιμές αντίδρασης για γεννήτριες στην υπομεταβατική, μεταβατική περίοδο και στην μόνιμη κατάσταση.

	X_d''	X_d'	X_d
Γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα	10-20%	15-25%	150-230%
Γεννήτρια Εκτύπων πόλων	15-25%	25-35%	70-120%

Η γενική αναλυτική έκφραση του ρεύματος σφάλματος, θεωρώντας ότι το σφάλμα εκδηλώνεται κατά τον μηδενισμό της τάσης, έχει ως εξής :

$$i_{sc}(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos \omega t - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_d}}$$

,όπου E : rms φασική τάση γεννήτριας

X_d'' : υπομεταβατική αντίδραση

X_d' : μεταβατική αντίδραση

X_d : σύγχρονη αντίδραση

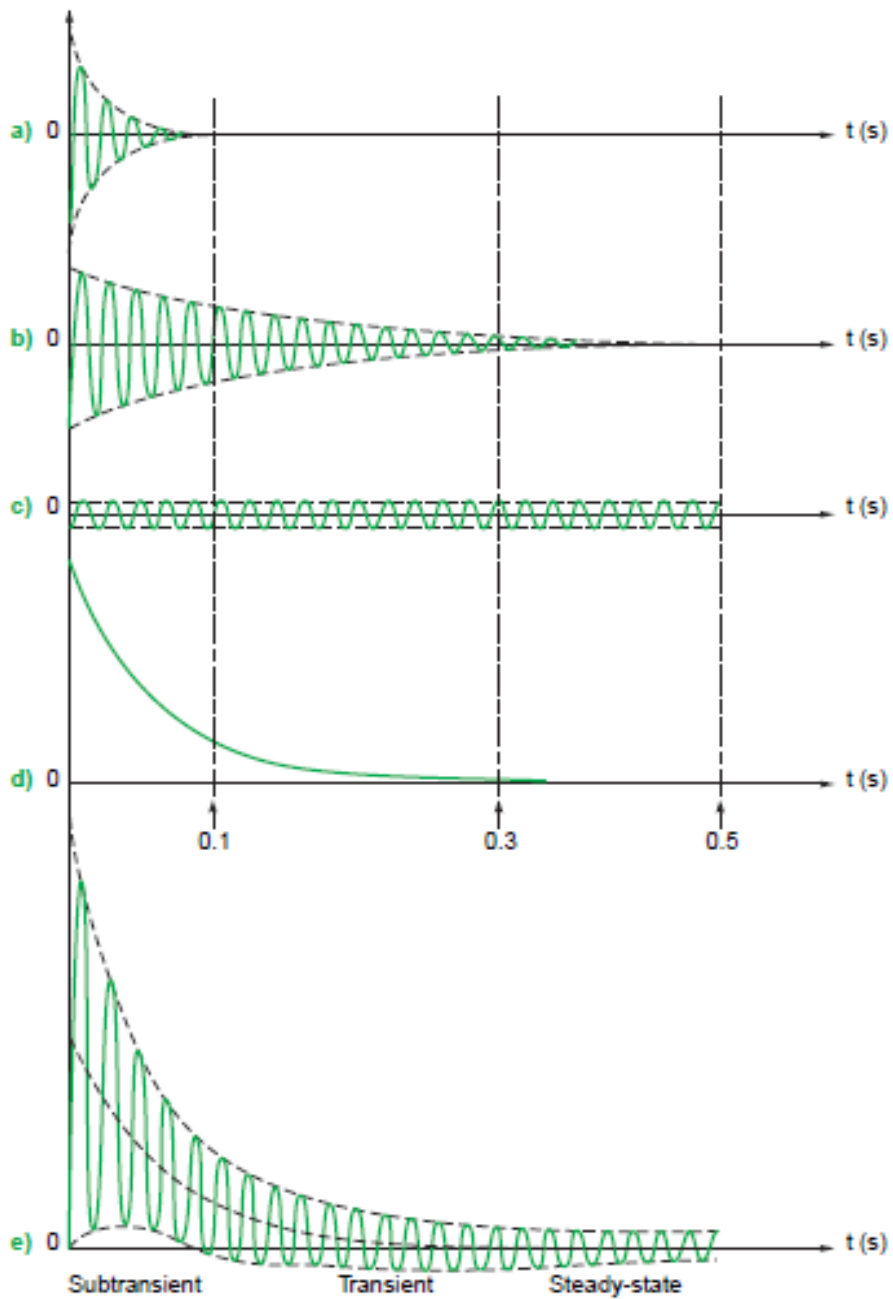
T_d'' : υπομεταβατική σταθερά χρόνου

T_d' : μεταβατική σταθερά χρόνου

T_a : συνεχής (απεριοδική) σταθερά χρόνου

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση το ρεύμα σφάλματος i_{sc} δίνεται ως επαλληλία τεσσάρων συνιστωσών.

- Τρεις εναλασσόμενες συνιστώσες ρεύματος (υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμης κατάστασης)
- Μια απεριοδική συνεχής συνιστώσα που οφείλεται στον έντονα επαγωγικό χαρακτήρα του κυκλώματος R-L



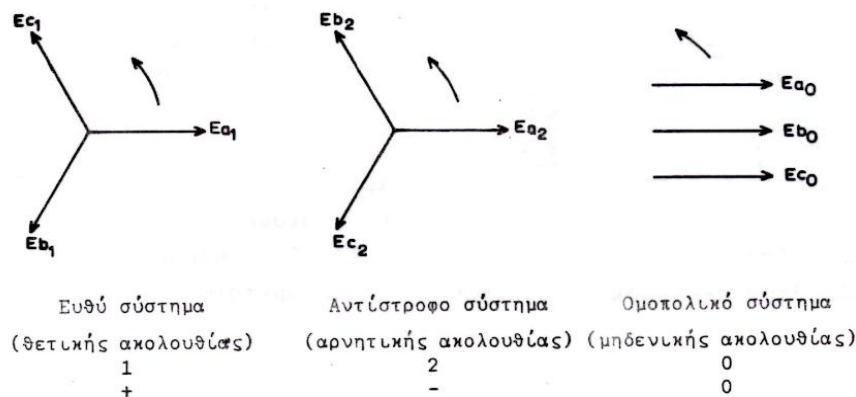
Σχήμα 1.5 Αποσύνθεση ρεύματος σφάλματος στις συνιστώσες του για βραχυκύκλωμα “κοντά” στην γεννήτρια [1]

- α) υπομεταβατική συνιστώσα ρεύματος
- β) μεταβατική συνιστώσα ρεύματος
- γ) συνιστώσα μόνιμης κατάστασης
- δ) απεριοδική (συνεχής) συνιστώσα
- ε) συνολικό ρεύμα σφάλματος

1.3 Αναλυτικός υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος

1.3.1 Μετασχηματισμός Συμμετρικών Συνιστωσών

Για την ανάλυση του ασύμμετρου σφάλματος, το ασύμμετρο τριφασικό σύστημα είναι δυνατόν να αναλυθεί σε τρία ανεξάρτητα μονοφασικά κυκλώματα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους στο σημείο της ασυμμετρίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια αλλαγή μεταβλητών, δηλαδή ένα μετασχηματισμό συνιστωσών όπως ο μετασχηματισμός των συμμετρικών συνιστωσών. Ιστορικά, πρώτος ο Stokvis το 1912 έδειξε τη δυνατότητα ανάλυσης ενός ασύμμετρου συστήματος ρευμάτων σε συνιστώσες ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το 1918 ο Fortesque εισήγαγε την ομοπολική συνιστώσα ρεύματος και τάσεως, και απέδειξε γενικότερα την δυνατότητα ανάλυσης ενός N-φασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες. Σύμφωνα λοιπόν, με τον μετασχηματισμό συμμετρικών συνιστωσών κάθε τριφασικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε τρία τριφασικά συστήματα, το ευθύ (1/+), το αντίστροφο (2/-) και το ομοπολικό (0/0), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.6 Τα τρία 3 - φασικά συστήματα του μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών [2]

Το τριφασικό σύστημα με το μετασχηματισμό των συμμετρικών συνιστωσών μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη ομάδα τριών (3) μονοφασικών συστημάτων, με αποτέλεσμα οι τάσεις και τα ρεύματα φάσεως να προκύπτουν με επαλληλία των συμμετρικών συνιστωσών τους :

$$E_a = E_{a0} + E_{a1} + E_{a2}$$

$$E_b = E_{b0} + E_{b1} + E_{b2}$$

$$E_c = E_{c0} + E_{c1} + E_{c2}$$

Συνήθως, για την ανάλυση ενός συστήματος χρησιμοποιούνται οι συμμετρικές συνιστώσες της φάσεως a. Των άλλων φάσεων μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις :

$$E_{b0} = E_{c0} = E_{a0}$$

$$E_{b1} = a^2 E_{a1}, E_{c1} = a E_{a1}$$

$$E_{b2} = a E_{a2}, E_{c2} = a^2 E_{a2}$$

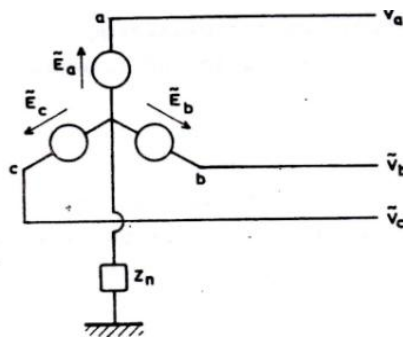
Επομένως ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών δίνεται σε μητρική μορφή ως εξής :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} \Rightarrow [E]_{abc} = [s][E]_{012}$$

,όπου E_a, E_b, E_c το τριφασικό σύστημα τάσεων και E_0, E_1, E_2 οι συμμετρικές συνιστώσες τάσης της φάσης a.

1.3.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Θεωρούμε ένα τριφασικό σύστημα τροφοδοτούμενο από μια συμμετρική τριφασική πηγή ή το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin (βλ.σχήμα 1.7). Τα ασύμμετρα σφάλματα εάν επηρεάζουν μία μόνο φάση θεωρείται συμβατικά ότι αφορούν την φάση a, αν δύο οι φάσεις αυτές είναι οι b και c. Επιπλέον αμελούνται τα προ του σφάλματος φορτία κατά την διάρκεια του σφάλματος.



Σχήμα 1.7 Τριφασικό σύστημα ή ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin [2]

Οι συνθήκες του συμμετρικού σφάλματος (3-φασικού) περιγράφονται από τις εξής σχέσεις ανυσματικών φασικών μεγεθών τάσης και ρεύματος :

$$V_a = V_b = V_c \quad (1.3.1)$$

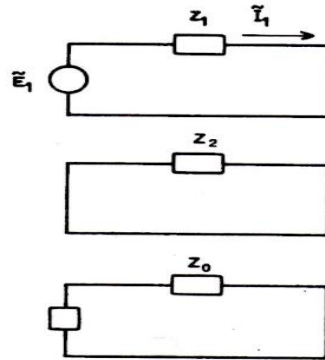
$$\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (1.3.2)$$

Από τις οποίες με ανάλυση στον χώρο των συμμετρικών συνιστωσών προκύπτει :

$$V_0 = V_1 = V_2 = 0 \quad (1.3.3)$$

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (1.3.4)$$

Τα τρία κυκλώματα είναι ανεξάρτητα, όπως θα το περίμενε κανείς λόγω της συμμετρίας, και κλειστά



Σχήμα 1.8 Κυκλώματα ακολουθίας κατά το τριφασικό σφάλμα [2]

Το ρεύμα σφάλματος της φάσεως α δίνεται από την σχέση :

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = \tilde{I}_1 = \frac{E_1}{Z_1} \quad (1.3.5)$$

Το ρεύμα σφάλματος των δύο άλλων φάσεων (b,c) έχει ίδιο μέτρο με αυτό της φάσεως α με διαφορά φάσης 120° μεταξύ διαδοχικών φάσεων.

1.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

A) Χωρίς αντίσταση σφάλματος

Οι βασικές συνθήκες που επικρατούν κατά το μονοφασικό σφάλμα είναι :

$$V_a = 0 \quad (1.3.6)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0 \quad (1.3.7)$$

Χρησιμοποιώντας τις συμμετρικές συνιστώσες των φασικών τάσεων και ρευμάτων παίρνουμε από τις σχέσεις (1.3.6) και (1.3.7) :

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0 \quad (1.3.8)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.9)$$

$$\tilde{I}_c = \tilde{I}_0 + a \tilde{I}_1 + a^2 \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.10)$$

Από τις (1.3.8) και (1.3.9) προκύπτει :

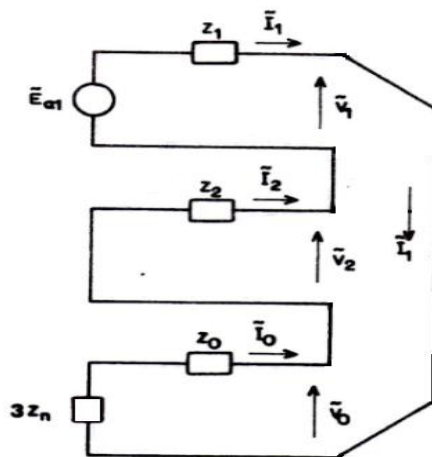
$$(a^2 - a)\tilde{I}_1 = (a^2 - a)\tilde{I}_2 \Rightarrow \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \quad (1.3.11)$$

$$\tilde{I}_0 = \frac{1}{3}(\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c) = \frac{1}{3}\tilde{I}_a = \frac{1}{3}(\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) \quad (1.3.12)$$

Από τις (1.3.11) και (1.3.12) εύκολα προκύπτει πως :

$$\tilde{I}_0 = \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \frac{1}{3} \tilde{I}_a \quad (1.3.13)$$

Με βάση λοιπόν τις σχέσεις (1.3.8) και (1.3.13) προκύπτει τελικά ο τρόπος σύνδεσης των ακολουθιακών κυκλωμάτων και φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1.9 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [2]

Στο σχήμα 1.9 η αντίσταση γείωσης του ουδετέρου κόμβου της πηγής εμφανίζεται στο ομοπολικό κύκλωμα με τριπλάσια τιμή ($3Z_n$) και αυτό ισχύει για όλες τις αντιστάσεις που διαρρέονται από ομοπολικά ρεύματα.

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως εύκολα βρίσκεται από κυκλωματική επίλυση ίσο με :

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = 3\tilde{I}_0 = 3 \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n} \quad (1.3.14)$$

Β) Με αντίσταση σφάλματος Z_F

Σε αυτήν την περίπτωση οι βασικές συνθήκες του σφάλματος είναι :

$$V_a = \tilde{I}_a Z_F \quad (1.3.20)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0 \quad (1.3.21)$$

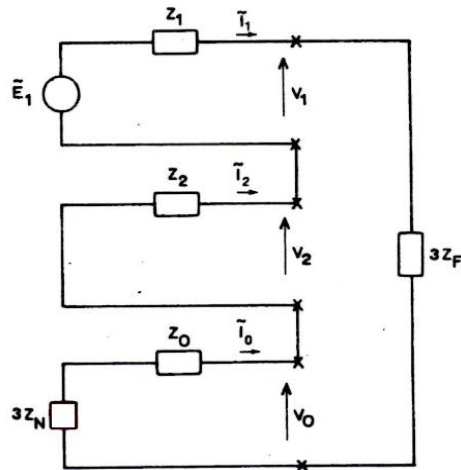
Μετασχηματίζοντας τις δύο προηγούμενες σχέσεις στον χώρο των συμμετρικών συνιστωσών έχουμε :

$$V_0 + V_1 + V_2 = \tilde{I}_a Z_F = \tilde{I}_F Z_F \quad (1.3.22)$$

$$\tilde{I}_0 = \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \frac{1}{3} \tilde{I}_F \quad (1.3.23)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3\tilde{I}_0 Z_F \quad (1.3.24)$$

Με βάση λοιπόν τις σχέσεις (1.3.22) και (1.3.23) προκύπτει ο τρόπος σύνδεσης των κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό σφάλμα προς γη.



Σχήμα 1.10 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη με αντίσταση σφάλματος [2]

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα ίσο με :

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = 3\tilde{I}_o = 3 \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n + 3Z_F} \quad (1.3.25)$$

1.3.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

A) Χωρίς αντίσταση σφάλματος

Οι συνθήκες του διφασικού προς γη σφάλματος είναι :

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (1.3.26)$$

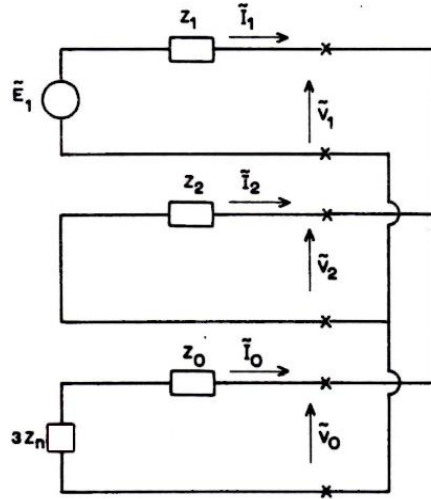
$$V_b = V_c = 0 \quad (1.3.27)$$

από τις οποίες προκύπτει :

$$\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.28)$$

$$V_0 = V_1 = V_2 \quad (1.3.29)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας στην θέση σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος.



Σχήμα 1.11 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [2]

$$\text{Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με : } \tilde{I}_F = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 2\tilde{I}_o - (\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) = 3\tilde{I}_o \quad (1.3.30)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος της φάσεως α :

$$V_o = V_1 = V_2 = E_1 \frac{Z_2 // (Z_o + 3Z_n)}{[Z_2 // (Z_o + 3Z_n)] + Z_1} \quad (1.3.31)$$

$$\tilde{I}_o = -\frac{V_o}{Z_o + 3Z_n} \quad (1.3.32)$$

Με βάση τις σχέσεις (1.3.30) – (1.3.32) το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος δίνεται από :

$$\tilde{I}_F = 3\tilde{I}_o = -3E_1 \frac{Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_o + Z_2Z_o + 3Z_n(Z_1 + Z_2)} \quad (1.3.33)$$

B) Με αντίσταση σφάλματος Z_F

Οι συνθήκες του διφασικού προς γη σφάλματος είναι :

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (1.3.34)$$

$$V_b = V_c = V_F = (\tilde{I}_b + \tilde{I}_c) Z_F \quad (1.3.35)$$

από τις οποίες προκύπτει :

$$\tilde{I}_o + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.36)$$

$$V_1 = V_2 \quad (1.3.37)$$

$$V_o - V_2 = 3\tilde{I}_o Z_F \quad (1.3.38)$$

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 3\tilde{I}_o \quad (1.3.39)$$

με χρήση των συμμετρικών συνιστωσών από τις δύο πρώτες προκύπτει :

$$\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \Rightarrow \tilde{I}_0 = -(\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) \quad (1.3.46)$$

$$\tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 + \tilde{I}_0 + a \tilde{I}_1 + a^2 \tilde{I}_2 = 0 \Rightarrow 2\tilde{I}_0 - \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.47)$$

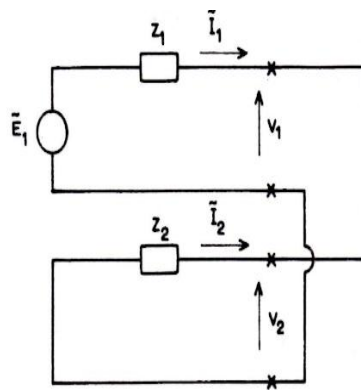
Από τις (1.3.46) και (1.3.47) προκύπτει ότι :

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (1.3.48)$$

$$\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.49)$$

ενώ από την (1.3.45) : $V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \quad (1.3.50)$

Από τις σχέσεις (1.3.48) – (1.3.50) προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας στην θέση σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος.



Σχήμα 1.13 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [2]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με : $I_F = I_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 \quad (1.3.51)$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος της φάσεως α :

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (1.3.52)$$

$$\tilde{I}_1 = -\tilde{I}_2 = \frac{E_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.3.53)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (1.3.52) και (1.3.53) στην σχέση (1.3.51) παίρνουμε το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος :

$$I_F = (a^2 - a)\tilde{I}_1 = -j\sqrt{3}\tilde{I}_1 = -j\frac{\sqrt{3}E_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1.3.54)$$

B) Με αντίσταση σφάλματος Z_F

Οι συνθήκες του διφασικού σφάλματος χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος έχουν ως εξής :

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (1.3.57)$$

$$\tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (1.3.58)$$

$$V_b - V_c = \tilde{I}_b Z_F \quad (1.3.59)$$

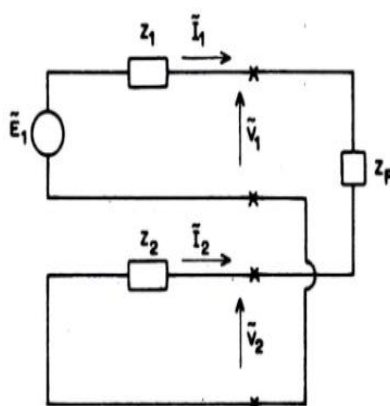
από τις οποίες προκύπτει :

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (1.3.58)$$

$$\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (1.3.59)$$

$$V_1 - V_2 = \tilde{I}_1 Z_F \quad (1.3.60)$$

Από τις τρεις τελευταίες σχέσεις (1.3.58) – (1.3.60) προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό σφάλμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος.



Σχήμα 1.14 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος [2]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με : $I_F = I_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2$ (1.3.61)

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος της φάσεως a :

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (1.3.62)$$

$$\tilde{I}_1 = -\tilde{I}_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (1.3.63)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (1.3.62) και (1.3.63) στην σχέση (1.3.61) παίρνουμε το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος :

$$I_F = (a^2 - a)\tilde{I}_1 = -j\sqrt{3}\tilde{I}_1 = -j\frac{\sqrt{3}E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (1.3.64)$$

1.4 Τυποποίηση της διαδικασίας υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

Στην διεθνή επιστημονική και τεχνική βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μέθοδοι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος, από τις οποίες ορισμένες έχουν συμπεριληφθεί σε διεθνή πρότυπα, λόγω της συγκριτικής υπεροχής που αυτές παρουσιάζουν αναφορικά με την ακρίβεια των εκτιμώμενων ρευμάτων, την πολυπλοκότητα της μεθόδου και τον υπολογιστικό φόρτο που αυτές συνεπάγονται. Ακολουθεί λοιπόν μια βιβλιογραφική ανασκόπηση και περιληπτική περιγραφή των πιο βασικών μεθόδων [1] :

- Το πρότυπο **C 15-105** το οποίο συνοδεύει το **NF C 15-100** (Normes Françaises low-voltage AC installations) περιγράφει τέσσερις (4) μεθόδους :

1. Μέθοδος ‘Σύνθετης Αντίστασης’ - ‘Impedance’ Method

Η μέθοδος ‘σύνθετης αντίστασης’ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος σε οποιαδήποτε θέση ενός ηλεκτρικού δικτύου με υψηλό επίπεδο ακρίβειας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο αθροίζονται οι επιμέρους αντιστάσεις και αντιδράσεις στον βρόχο σφάλματος από την πηγή έως και την θέση σφάλματος για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης β/κ. Η τιμή του αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος, I_{sc} , προκύπτει από εφαρμογή του νόμου του Ohm :

$$I_{sc} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \sum z}$$

Απαιτείται η γνώση των χαρακτηριστικών μεγεθών όλων των επιμέρους στοιχείων στο βρόχο σφάλματος, αν και ορισμένες παράμετροι δεν λαμβάνονται υπόψιν, δηλαδή :

- αμελούνται οι αντιστάσεις των διακοπών ισχύος και των μέσων προστασίας γενικά
- οι αντιστάσεις των στρεφόμενων μηχανών

2. Μέθοδος ‘Σύνθεσης’ – ‘Composition’ Method

Η μέθοδος ‘Σύνθεσης’ χρησιμοποιείται όταν δεν είναι γνωστές οι προ του σφάλματος συνθήκες, που επικρατούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Ο προσδιορισμός της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του ανάντη συστήματος πραγματοποιείται μέσω εκτίμησης της συνεισφοράς ρεύματος β/κ στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο χαμηλότερου επιπέδου τάσης. Επιπλέον θεωρείται σταθερός συντελεστής ισχύος β/κ $\cos \varphi_{sc} = R_{sc} / X_{sc}$, γεγονός που δικαιολογεί την αντικατάσταση του ανυσματικού αθροίσματος των σύνθετων αντιστάσεων με το αντίστοιχο αλγεβρικό ($|\sum Z| \approx \sum |Z|$). Η προσεγγιστική αυτή μέθοδος υπολογίζει το αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος με ικανοποιητική ακρίβεια για ηλεκτρικά δίκτυα και εγκαταστάσεις ονοματικής ισχύος μέχρι 800 kVA.

3. Μέθοδος ‘Συμβατική’ – ‘Conventional’ Method

Εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου οι αντιστάσεις ή το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ανάντη συστήματος δεν είναι γνωστά ενώ απαιτείται ο υπολογισμός ελάχιστων ρεύματων σφάλματος καθώς και ρευμάτων στο τέρμα μιας γραμμής. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψιν μόνο τις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών, εφαρμόζοντας στην περίπτωση γραμμών μεγάλης διατομής ένα συντελεστή διόρθωσης (> 1) για να λάβει υπόψιν την επαγωγική αντίδραση αυτών (1.15 για 150 mm^2 , 1.2 για 185 mm^2 , 2.5 για 240 mm^2 και 3 για 300 mm^2). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως για θέσεις σφάλματος αρκετά μακριά από την πηγή σφάλματος (δίκτυο τροφοδότησης και μονάδες ισχύος).

4. Μέθοδος ‘Απλούστευσης’ – ‘Simplified’ Method

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε πίνακες, που βάση αρκετών απλοποιητικών παραδοχών, υποδεικνύουν για κάθε αγωγό διατομής :

- Το χαρακτηριστικό ρεύμα της συσκευής προστασίας από υπερφόρτιση
- Το μέγιστο μήκος του συστήματος καλωδίωσης για να εξασφαλιστεί η προστασία έναντι έμμεσης επαφής
- Το αποδεκτό μήκος από άποψη βύθισης τάσης των γραμμών

Τα δεδομένα των αντίστοιχων πινάκων είναι ουσιαστικά αποτέλεσμα της εφαρμογής κυρίως της ‘συμβατικής’ μεθόδου και της ‘συνθέσεως’. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως κατά την επέκταση ενός υφιστάμενου δικτύου ή εγκατάστασης, για το οποίο δεν υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά στοιχεία, ενώ εφαρμόζεται απευθείας σε συστήματα XT ($U_n \leq 1\text{kV}$) και με διορθωτικούς συντελεστές στην περίπτωση τάσης διάφορης από 230 / 400V.

- Το πρότυπο **IEC 60909** (VDE 0102) βρίσκει εφαρμογή σε όλα τα δίκτυα, ακτινικά ή βροχοειδή, μέχρι 550 kV και βασίζεται στην εξής μέθοδο :

5. Μέθοδος Ισοδύναμης Πηγής Τάσης - Equivalent Voltage Source Method

Η μέθοδος αυτή, που στηρίζεται στο θεώρημα Thevenin, τοποθετεί μια ισοδύναμη πηγή τάσης στην θέση σφάλματος και υπολογίζει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ (ισοδύναμη αντίσταση Thevenin), όπως φαίνεται από την θέση σφάλματος. Τα ισοδύναμα δίκτυα τροφοδότησης, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές αντικαθίστανται από τις εσωτερικές τους αντιστάσεις (θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας) με χρήση διορθωτικών συντελεστών ανάλογα με τον τρόπο διασύνδεσης τους στο δίκτυο, ενώ τα στατικά (μη στρεφόμενα) φορτία αμελούνται.

- Το πρότυπο **ANSI C 37.010** προτείνει μια μέθοδο διαχωρισμού του κυκλώματος σφάλματος στις επιμέρους συνιστώσες του, ωμική (R) και επαγωγική (X) :

6. Απλοποιημένη Μέθοδος E/X - E/X Simplified Method

Η μέθοδος E/X προσδιορίζει rms συμμετρικά ρεύματα σφάλματος, βάση των οποίων γίνεται η διαστασιολόγηση και τελική επιλογή των μέσων προστασίας. Στα πλαίσια αυτής της μεθόδου εφαρμόζεται η τεχνική διαχωρισμού R/X κυκλώματος σύμφωνα με την οποία προσδιορίζεται ξεχωριστά η ισοδύναμη

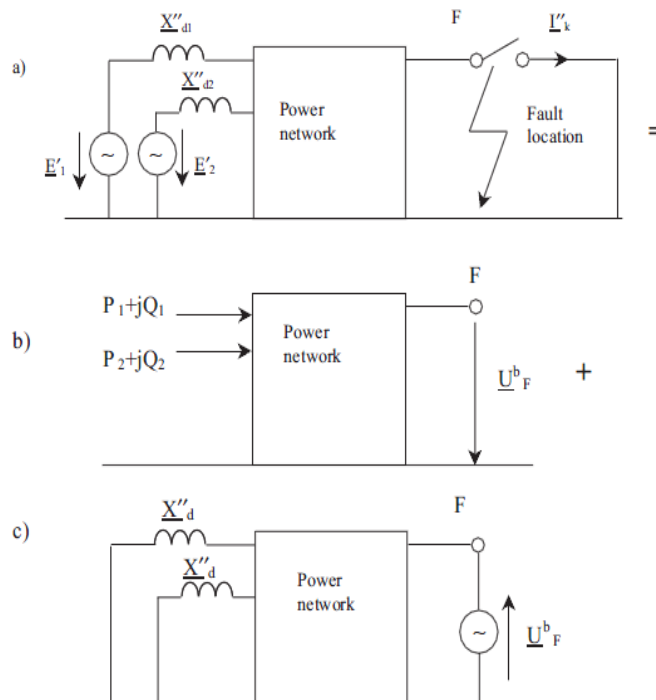
αντίδραση (X) και αντίσταση (R) που 'βλέπει' το σφάλμα. Οι αντιδράσεις των στρεφόμενων μηχανών διορθώνονται μέσω κατάλληλων συντελεστών με βάση το είδος/τύπο της μηχανής και το duty type του υπό προσδιορισμό ρεύματος ενώ, τα προ του σφάλματος φορτία αμελούνται.

- Υπάρχουν και μέθοδοι που χρησιμοποιούν την αρχή της επαλληλίας (superposition principle) κατά τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος, σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται τα προ του σφάλματος ρεύματα φορτίου :

7. Μέθοδος Επαλληλίας – Superposition Method

Η μέθοδος της επαλληλίας αποτελεί την πιο ακριβή μέθοδο υπολογισμού ρεύματος σφάλματος αποτελούμενη από τρία (3) διαδοχικά στάδια.

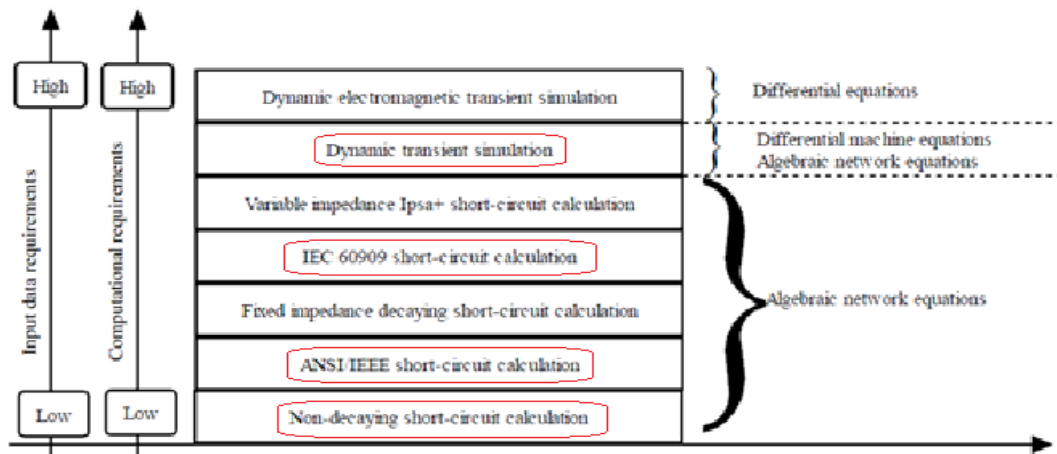
- Στάδιο 1^ο: Υπολογίζεται η προ του σφάλματος κατάσταση του δικτύου (pre fault state) δηλαδή τα ρεύματα φόρτισης, τάσεις και ροή ενεργού - αέργου ισχύος στην μόνιμη κατάσταση πριν το βραχυκύκλωμα (βλ. σχήμα 1.15.β)
- Στάδιο 2^ο: Προσδιορίζονται τα προ του σφάλματος ρεύματα φόρτισης (I_b) και η προ του σφάλματος τάση στην θέση σφάλματος F (U_F^b) με αρνητικό πρόσημο. Η τάση αυτή είναι η μοναδική ενεργή πηγή τάσης στο δίκτυο ενώ οι εσωτερικές τάσεις (HEΔ) βραχυκυκλώνονται (βλ. σχήμα 1.15.γ)
- Στάδιο 3^ο: Οι συνθήκες των δύο προηγούμενων σταδίων υπερτίθενται δίνοντας μηδενική τάση στην θέση σφάλματος και ρεύμα σφάλματος με αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο ακριβείας (βλ. σχήμα 1.15.α)



Σχήμα 1.15 Εφαρμογή της Αρχής της Υπέρθεσης (Method of Superposition) α) υπέρθεση των β/γ, β) αδιατάρακτο ηλεκτρικό δίκτυο (undisturbed), γ) Ισοδύναμο Κύκλωμα Thevenin [3]

Η ιδιαιτερότητα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται πριν τον προσδιορισμό του ρεύματος σφάλματος, η γνώση των λειτουργικών συνθηκών μόνιμης κατάστασης του δικτύου, που εξασφαλίζεται με ανάλυση ροής φορτίου (Load Flow Analysis).

- Τέλος αξίζει να σημειωθεί, παρά τον εξαιρετικά επίπονο υπολογιστικό φόρτο που αυτή συνεπάγεται, η μέθοδος μεταβατικής ανάλυσης (Transient Analysis Method) σύμφωνα με την οποία ολόκληρο το δίκτυο αναπαρίσταται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 1.16 Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης των απαιτήσεων σε υπολογιστικό φόρτο αλγεβρικών και μη μεθόδων υπολογισμού ρεύματος σφάλματος [4]

Η συγκριτική υπεροχή των υπολογιστικών μεθόδων που περιλαμβάνονται στα Πρότυπα IEC 60909 και ANSI C 37.010 έχει καταστήσει τα τελευταία ως τα πλέον χρησιμοποιούμενα, σε διεθνές επίπεδο, για τον υπολογισμό ρευμάτων σφάλματος. Στα επόμενα δύο κεφάλαια γίνεται αναλυτική περιγραφή της υπολογιστικής μεθόδου των Προτύπων IEC και ANSI αντίστοιχα, καθώς και της γενικότερης φιλοσοφίας που 'κρύβεται' πίσω από αυτές.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή του Προτύπου IEC 60909

2.1 Εισαγωγή

Ιστορικά, η πρώτη έκδοση του Προτύπου IEC 909 (1988) προήλθε από το Γερμανικό Πρότυπο VDE 0102 [11] και από τότε αποτελεί το βασικό τεχνικό οδηγό για τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων στον χώρο της Ευρώπης. Το Πρότυπο IEC 60909 [5] περιέχει μια τυποποιημένη διαδικασία για τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων, με εφαρμογή σε δίκτυα μέχρι 550 kV, στα 50 ή 60 Hz. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να ορίσει μια σύντομη, γενική και εύκολη στο χειρισμό μέθοδο για τον υπολογισμό του αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος, δίνοντας αποτελέσματα προς την ασφαλή πλευρά.

2.2 Όροι και Ορισμοί

Σύμφωνα με τον κανονισμό του προτύπου IEC 60909, το βραχυκύκλωμα είναι η τυχαία ή η εσκεμμένη αγώγιμη σύνδεση, διαμέσου σχετικά μικρής ωμικής ή σύνθετης αντίστασης, δύο ή περισσοτέρων σημείων ενός κυκλώματος, τα οποία σε ομαλές συνθήκες λειτουργίας βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά. Το αποτέλεσμα του βραχυκυκλώματος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Συνήθεις αιτίες αλλά και αποτελέσματα από την εμφάνιση βραχυκυκλώματος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο αναλύονται παρακάτω:

• Αιτίες

- 1) Υπερθερμάνσεις λόγω παρουσίας υπερεντάσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- 2) Εκφορτίσεις από διασπάσεις λόγω υπερτάσεων.
- 3) Δημιουργία ηλ.τόξων λόγω της έντονης παρουσίας υγρασίας σε συνδυασμό με ρυπασμένο αέρα, ειδικά στους μονωτήρες.

• Επιδράσεις

- 1) Διακοπή της παροχής της ισχύος.
- 2) Καταστροφή εξαρτημάτων του συστήματος.
- 3) Εμφάνιση ανεπιθύμητων μηχανικών και θερμικών τάσεων στον ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη η παράθεση των ορισμών βασικών ηλεκτρικών όρων/μεγεθών ώστε να καταστεί δυνατός ο διαχωρισμός μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο σημείο που γίνεται το σφάλμα και των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης στους κλάδους του δικτύου.

Συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης : ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης συμμετρικής συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης, αμελώντας τυχόν απεριοδικές συνιστώσες αυτού.

Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (I_k'') : ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης συμμετρικής συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης, αν η σύνθετη αντίσταση β/κ διατηρεί την αρχική της τιμή ($Z_k = Z_k(0^+)$), θεωρώντας ως αρχή μέτρησης του χρόνου την στιγμή εμφάνισης του σφάλματος.

Αρχική Συμμετρική Ισχύς Βραχυκύκλωσης (S_k'') : λογιστικό μέγεθος για την σχεδιομελέτη βραχυκύκλωσης ενός ηλεκτρικού δικτύου που χρησιμεύει στην διαστασιολόγηση της αντοχής του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, το οποίο δίνεται από την σχέση $S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$, όπου U_n η ονομαστική πολική τάση στη θέση σφάλματος προ του σφάλματος.

Φθίνουσα (απεριοδική) dc συνιστώσα Ρεύματος Βραχυκύκλωσης (i_{dc}) : μέση τιμή της άνω και κάτω περιβάλλουσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης η οποία φθίνει από μια αρχική τιμή (A) στο μηδέν.

Ρεύμα Διάσπασης (I_b) : ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος που ρέει μέσω του διακόπτη ισχύος κατά την αποκοπή του πρώτου πόλου.

Μέγιστο Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (I_p) : μέγιστη δυνατή στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Ρεύμα Βραχυκύκλωσης Μόνιμης Κατάστασης (I_k) : ενεργός τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης μετά την εξάλειψη του μεταβατικού φαινομένου.

Βραχυκύκλωμα “μακριά” από γεννήτρια : βραχυκύκλωμα κατά την διάρκεια του οποίου το μέτρο του ενεργού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος παραμένει σχετικά σταθερό (βλ.σχήμα 2.1).

Βραχυκύκλωμα “κοντά” σε γεννήτρια : βραχυκύκλωμα στο οποίο τουλάχιστον μία σύγχρονη ή ασύγχρονη μηχανή συνεισφέρει αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος υπερδιπλάσιο του ρεύματος κανονικής λειτουργίας (βλ.σχήμα 2.2).

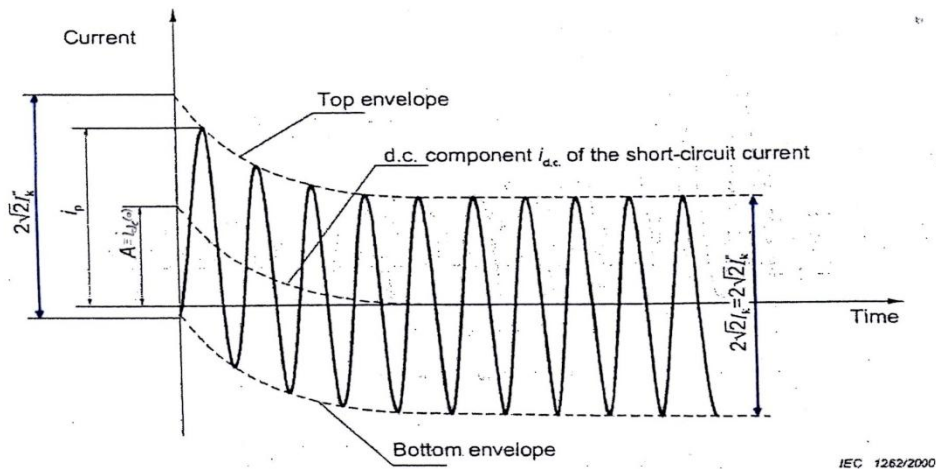
Σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης ορθού συστήματος (Z_1) : σύνθετη αντίσταση του συστήματος θετικής ακολουθίας, όπως φαίνεται από τη θέση του σφάλματος.

Σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης αντιστρόφου συστήματος (Z_2) : σύνθετη αντίσταση του συστήματος αρνητικής ακολουθίας, όπως φαίνεται από τη θέση του σφάλματος.

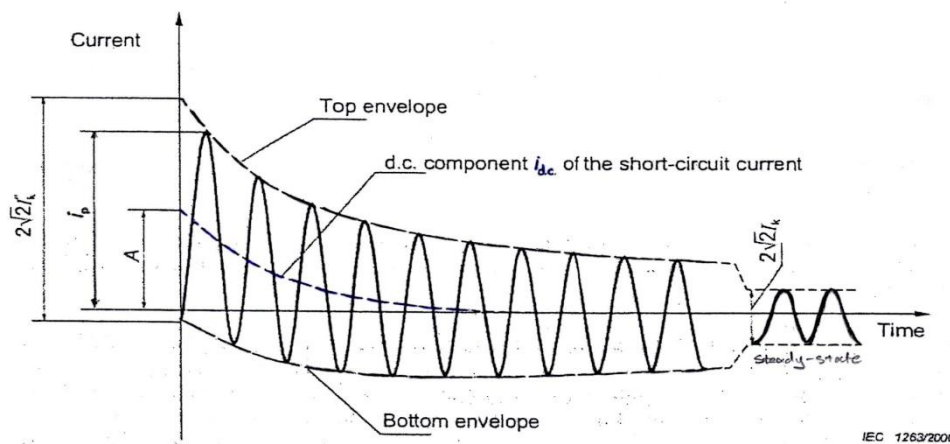
Σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης ομοπολικού συστήματος (Z_0) : σύνθετη αντίσταση του συστήματος μηδενικής ακολουθίας όπως φαίνεται από τη θέση του σφάλματος, η οποία περιλαμβάνει τρεις φορές την σύνθετη αντίσταση γείωσης του ουδετέρου Z_n .

2.3 Χρονική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Τα σχήματα 2.1 και 2.2 δείχνουν τη χρονική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης για τις περιπτώσεις σφαλμάτων “μακριά” από και “κοντά” σε, γεννήτρια αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1 : Ρεύμα Βραχυκύκλωσης για βραχυκύκλωμα “μακριά” από γεννήτρια με σταθερή a.c συνιστώσα [5]



Σχήμα 2.2 : Ρεύμα Βραχυκύκλωσης για βραχυκύκλωμα “κοντά” σε γεννήτρια με φθίνουσα a.c συνιστώσα [5]

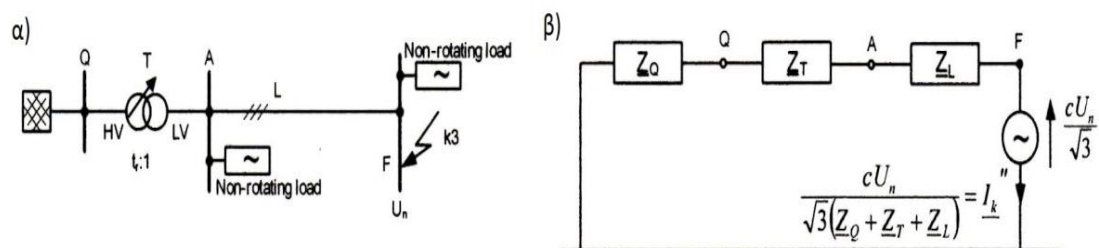
Η d.c απериοδική συνιστώσα ξεκινάει από μια αρχική τιμή A και φθίνει με το χρόνο στο μηδέν. Στο βραχυκύκλωμα “κοντά” σε γεννήτρια η υπομεταβατική και μεταβατική συμπεριφορά της σύγχρονης μηχανής έχει σημαίνον ρόλο στην διαμόρφωση του ρεύματος σφάλματος δίνοντας αρχικά r.m.s συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (I_k'') υπερδιπλάσιο του ρεύματος κανονικής λειτουργίας (I_{rG}), ενώ μετά την εξασθένιση όλων των μεταβατικών φαινομένων αποκαθίσταται στην τιμή μόνιμης κατάστασης (I_k).

2.4 Μέθοδος Ισοδύναμης Πηγής Τάσης

Ο υπολογισμός του μέγιστου και ελάχιστου ρεύματος σφάλματος με βάση το Πρότυπο IEC 60909 στηρίζεται στις εξής, απλουστευτικού χαρακτήρα, παραδοχές :

- α) Κατά την διάρκεια του σφάλματος δεν υπάρχει αλλαγή στον τύπο του σφάλματος
- β) Κατά την διάρκεια του σφάλματος δεν υπάρχει αλλαγή στο τμήμα του δικτύου που μετέχει
- γ) Θεωρείται ότι κάθε μετασχηματιστής βρίσκεται στην ονομαστική του λήψη και ανάγεται η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή με βάση τον ονομαστικό λόγο μ/σ , t_r , αυτού. Η θεώρηση αυτή δικαιολογείται λόγω της εισαγωγής του συντελεστή διόρθωσης συνθέτου αντιστάσεως k_T για μετασχηματιστές δικτύου (network transformers)
- δ) Η αντίσταση σφάλματος Z_f θεωρείται αμελητέα (‘νεκρό’ βραχυκύκλωμα)
- ε) Αμελούνται οι χωρητικότητες και οι εγκάρσιες επιδεκτικότητες των γραμμών, εκτός αυτών του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας
- στ) Αμελούνται τα μη στρεφόμενα φορτία (στατικά) καθώς τα ρεύματα φορτίου είναι αμελητέα σε σύγκριση με τα ρεύματα σφάλματος

Κατά τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε ηλεκτρικά δίκτυα διαφόρων επιπέδων τάσης, οι σύνθετες αντιστάσεις των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων του δικτύου ανάγονται στην πλευρά του σφάλματος, δηλαδή στην ονομαστική πολική τάση U_n , που επικρατεί στην θέση σφάλματος, προ του σφάλματος. Το πρότυπο IEC 60909 χρησιμοποιεί την μέθοδο ισοδύναμης πηγής τάσης για τον προσδιορισμό του μέγιστου/ελάχιστου ρεύματος σφάλματος στην τυχαία θέση σφάλματος F. Η μέθοδος βασίζεται στην εισαγωγή μιας ισοδύναμης πηγής τάσης, $cU_n/\sqrt{3}$, στην θέση σφάλματος F, με βραχυκυκλωμένες όλες τις υπόλοιπες πηγές τάσης. Τα επιμέρους δίκτυα τροφοδότησης, οι σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές αντικαθίστανται από την εσωτερική τους σύνθετη αντίσταση. Η μέθοδος της ισοδύναμης πηγής τάσης απεικονίζεται στο σχήμα 2.3, που ακολουθεί, για την περίπτωση συμμετρικού σφάλματος.



Σχήμα 2.3 : 3-φασικό βραχυκύκλωμα στην θέση F α) σχηματικό διάγραμμα, β) ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα θετικής ακολουθίας [6]

Στην περίπτωση 3-φασικού σφάλματος, το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος I_k'' δίνεται από την σχέση :

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k}$$

,όπου Z_k το μέτρο της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης Z_k του ανάντη συστήματος, όπως φαίνεται από την θέση σφάλματος F.

Η μέθοδος της ισοδύναμης πηγής τάσης κάνει χρήση της ονομαστικής τάσης του δικτύου και των ονομαστικών μεγεθών των στοιχείων του εξοπλισμού, για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Για να εξασφαλιστεί ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας των αποτελεσμάτων, το πρότυπο λαμβάνει υπόψιν τις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου (τάσεις προ του σφάλματος, φόρτιση Μ/Σ, θέση του ΣΑΤΥΦ στους Μ/Σ ισχύος κ.ά.) εισάγοντας την χρήση διάφορων συντελεστών διόρθωσης για τις σύνθετες αντιστάσεις των ηλεκτρικών στοιχείων του δικτύου. Επιπλέον, οι ακραίες διακυμάνσεις γύρω από την ονομαστική τάση του δικτύου στην θέση σφάλματος U_n , λαμβάνονται υπόψιν μέσω του συντελεστή διόρθωσης τάσης c , όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Ονομαστική Τάση U_n	c_{\max} για υπολογισμό $I_k''_{\max}$	c_{\min} για υπολογισμό $I_k''_{\min}$
Χαμηλή Τάση $100 \text{ V} \leq U_n \leq 1 \text{ kV}$	1.05 ¹⁾ 1.10 ²⁾	0.95
Μέση Τάση $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$	1.10	1.00
Υψηλή Τάση $U_n > 35 \text{ kV}$	1.10	1.00
1) Για δίκτυα XT με ανοχή $\pm 6\%$, 2) Για δίκτυα XT με ανοχή $\pm 10\%$		

Πίνακας 2.1 Συντελεστής διόρθωσης τάσης c για υπολογισμό μέγιστου/ελάχιστου ρεύματος σφάλματος [5]

2.5 Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Στοιχείων του Δικτύου

2.5.1 Γενικά

Η μοντελοποίηση ενός ηλεκτρικού συστήματος γίνεται με την περιγραφή ισοδύναμου κυκλώματος των επιμέρους στοιχείων αυτού. Συγκεκριμένα, τα δίκτυα τροφοδότησης, οι σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές, οι μετασχηματιστές ισχύος, οι εναέριες γραμμές μεταφοράς, τα υπόγεια καλώδια αντικαθίστανται από τις εσωτερικές τους σύνθετες αντιστάσεις. Επειδή, το Πρότυπο [5] θεωρεί ότι οι Μ/Σ ισχύος βρίσκονται στην ονομαστική τους λήψη, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι συνθήκες λειτουργίας του δικτύου (τάσεις προ του σφάλματος, στάθμη φόρτισης κ.α), οι σύνθετες αντιστάσεις των γεννητριών (G), των μετασχηματιστών (T) και των μονάδων ισχύος (S) πολλαπλασιάζονται με διορθωτικούς συντελεστές αντίστασης K_G , K_T και K_S ή K_{SO} αντίστοιχα [7]. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι συντελεστές διόρθωσης της σύνθετης αντίστασης των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων ενός δικτύου.

Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός	Σύνθετη Αντίσταση	Συντελεστής Διόρθωσης
Μετασηματιστής (με ή χωρίς ΣΑΤΥΦ)	$Z_{TK} = k_T Z_T$	$k_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1+0,6x_T}$
Σύγχρονη Γεννήτρια	$Z_{GK} = k_G Z_G$	$k_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1+x_d'' \sin \varphi_{rG}}$
Μονάδα Ισχύος χωρίς ΣΑΤΥΦ	$Z_{SO} = K_{SO} (t_r^2 Z_G + Z_{THV})$	$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} (1+p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1+x_d'' \sin \varphi_{rG}}$
Μονάδα Ισχύος με ΣΑΤΥΦ	$Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV})$	$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1+ x_d'' - x_T \sin \varphi_{rG}}$

Πίνακας 2.2 Συντελεστές διόρθωσης συνθέτου αντιστάσεως

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί επεξήγηση των συντελεστών του πίνακα 2.2 όπου οι δείκτες Q, T, G και M αναφέρονται σε ισοδύναμο δίκτυο τροφοδότησης, μετασηματιστή ισχύος, σύγχρονη μηχανή (γεννήτρια) και ασύγχρονη μηχανή (κινητήρας) αντίστοιχα. Οι δείκτες r, n υποδηλώνουν χαρακτηριστικές, ονομαστικές τιμές αντίστοιχα ενώ πεζά γράμματα ανηγμένες ποσότητες (p.u) στα χαρακτηριστικά μεγέθη τάσης/ισχύος του εξοπλισμού.

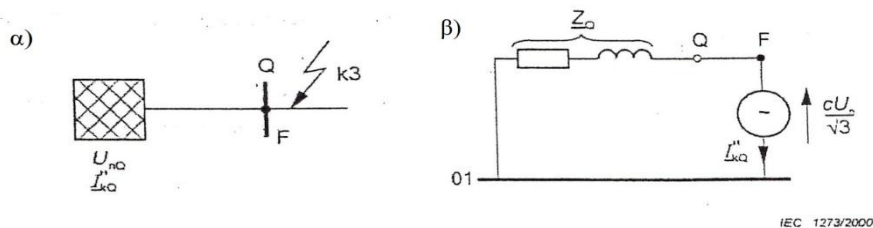
2.5.2 Ισοδύναμο Δίκτυο Τροφοδότησης

Για τριφασικό (συμμετρικό) σφάλμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, το οποίο τροφοδοτείται από ένα ισοδύναμο δίκτυο με γνωστή συνεισφορά αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος I_{kQ}'' , η σύνθετη αντίσταση του δικτύου τροφοδότησης Z_Q στο σημείο σύνδεσης Q, δίνεται από :

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''}, \text{ όπου } c = c_{max} = 1.1 \text{ για } U_{nQ} > 1 \text{ kV}$$

Με γνωστό λόγο R_Q / X_Q , το X_Q προκύπτει ίσο με : $X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/X_Q)^2}}$

Για δίκτυα τροφοδότησης ονομαστικής τάσης πάνω από 35 kV (δίκτυα YT) το Πρότυπο IEC αμελεί την ωμική αντίσταση ($R_Q = 0$), ενώ για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις προτείνει, ως ασφαλή υπόθεση, $R_Q / X_Q = 0.1$ με $X_Q = 0.995 Z_Q$.



Σχήμα 2.4 : Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό σύνδεσης ισοδύναμου δικτύου Q
 α) σχηματικό διάγραμμα, β) ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα θετικής ακολουθίας [5]

2.5.3 Μετασχηματιστές Ισχύος

Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας Z_T του μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων, με ή χωρίς σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), δίνεται από τις εξής σχέσεις :

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

, όπου U_{rT} : η ονομαστική τάση του Μ/Σ (στην πλευρά ΥΤ ή ΜΤ)

I_{rT} : το ονομαστικό ρεύμα του Μ/Σ (στην πλευρά ΥΤ ή ΜΤ)

S_{rT} : η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του Μ/Σ

u_{kr} : η ονομαστική τάση βραχυκυκλώσεως (%) υπό ονομαστικό ρεύμα

u_{Rr} : η ονομαστική ωμική συνιστώσα της τάσης βραχυκυκλώσεως (%)

P_{krT} : οι ωμικές απώλειες ισχύος του Μ/Σ υπό ονομαστικό ρεύμα

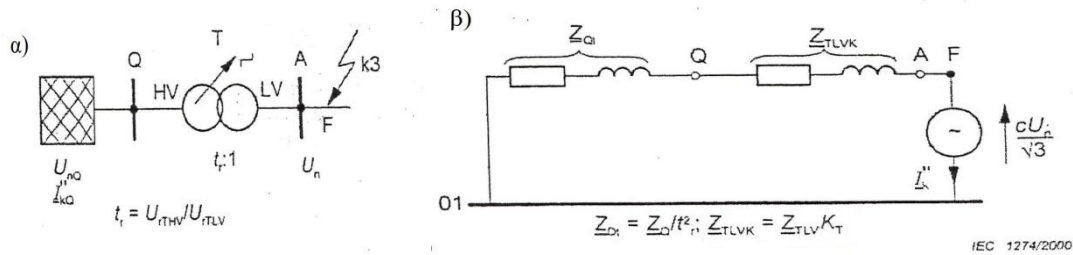
Η ωμική συνιστώσα της τάσης βραχυκυκλώσεως u_{Rr} μειώνεται με το μέγεθος του μετασχηματιστή, ενώ για μεγάλους μετασχηματιστές (> 200 MVA) αμελείται.

Στην περίπτωση ενός μετασχηματιστή δικτύου (με ή χωρίς ΣΑΤΥΦ), που συνδέει δύο ή περισσότερα δίκτυα, εισάγεται ο διορθωτικός συντελεστής K_T , δίνοντας σύνθετη αντίσταση ίση με : $Z_{TK} = k_T Z_T$, όπου $Z_T = R_T + jX_T$

$$k_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T}$$

c_{\max} : συντελεστής τάσης που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση U_n του δικτύου που συνδέεται στην πλευρά XT του μ/σ διασύνδεσης

x_T : η σχετική επαγωγική αντίδραση του Μ/Σ ($x_T = \frac{X_T}{Z_{rT}}$ με $Z_{rT} = \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$)



Σχήμα 2.5 : Τριφασικό βραχυκύκλωμα στην πλευρά XT του Μ/Σ δικτύου
α) σχηματικό διάγραμμα, β) ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα θετικής ακολουθίας [5]

2.5.4 Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς / Υπόγεια Καλώδια

Το Πρότυπο IEC αμελεί τις εγκάρσιες χωρητικότητες του μοντέλου ισοδύναμου π , για την αναπαράσταση γραμμών και καλωδίων. Επομένως, η αναπαράσταση αυτών γίνεται μέσω μιας εν σειράς συνθέτου αντιστάσεως $\tilde{Z}_L = R_L + jX_L$. Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης θετικής ακολουθίας γραμμών, $\tilde{Z}_L = \tilde{Z}_L(1) = \tilde{Z}_L(2)$ και μηδενικής ακολουθίας, $\tilde{Z}_L(0)$, απαιτούνται τα χαρακτηριστικά των αγωγών (διατομές, ειδικές αντιστάσεις) καθώς και δεδομένα γεωμετρίας των γραμμών (διάταξη αγωγών, αποστάσεις κέντρου μεταξύ αγωγών κ.α) [8][9]. Για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης των καλωδίων και για τα τρία κυκλώματα ακολουθίας απαιτούνται τα χαρακτηριστικά του καλωδίου (τύπος μόνωσης, διηλεκτρική σταθερά μόνωσης k) και των αγωγών που αυτό περιλαμβάνει (εσωτερική/εξωτερική ακτίνα, Μέση Γεωμετρική Ακτίνα GMR, αποστάσεις κέντρου μεταξύ αγωγών, γεωμετρικός συντελεστής G) [8][9][10].

2.5.5 Σύγχρονες Γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια αντικαθίσταται από την σύνθετη αντίσταση $\tilde{Z}_G = R_G + jX_d''$, που παρουσιάζει κατά την υπομεταβατική περίοδο του σφάλματος. Το πρότυπο IEC εισάγει συντελεστές διόρθωσης της σύνθετης αντίστασης \tilde{Z}_G ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης της σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο :

– Σύγχρονη Γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο

$$k_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$$

$$Z_{GK} = k_G Z_G = k_G (R_G + j X_d'')$$

, όπου

c_{max} : ο συντελεστής διόρθωσης τάσης (βλ.πίνακα 2.4)

U_n : η ονομαστική τάση του συστήματος (πολική)

U_{rG} : η ονομαστική τάση της γεννήτριας (πολική)

φ_{rG} : η γωνία που σχηματίζει η ον.φασική τάση $\tilde{U}_{rG} / \sqrt{3}$ της γεννήτριας με το ον. ρεύμα φάσης \tilde{I}_{rG}

x_d'' : η σχετική υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας ($x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}}$ με $Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$)

Ακολουθούν τυπικές τιμές της υπομεταβατικής ωμικής αντίστασης R_G της σύγχρονης γεννήτριας, με βάση τα ονομαστικά μεγέθη τάσης /ισχύος αυτής.

Για σύγχρονες γεννήτριες με $U_{rG} > 1\text{kV}$ και $S_{rG} \geq 100\text{MVA}$: $R_G = 0,05 X_d''$

Για σύγχρονες γεννήτριες με $U_{rG} > 1\text{kV}$ και $S_{rG} < 100\text{MVA}$: $R_G = 0,07 X_d''$

Για σύγχρονες γεννήτριες με $U_{rG} \leq 1\text{kV}$: $R_G = 0,15 X_d''$

– Σύγχρονη Γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης χωρίς ΣΑΤΥΦ (Μονάδα Ισχύος χωρίς ΣΑΤΥΦ)

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$$

$$Z_{SO} = K_{SO} (t_r^2 Z_G + Z_{THV})$$

, όπου

\tilde{Z}_{SO} : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση της μονάδος ισχύος (σύγχρονη γεννήτρια και Μ/Σ) ανηγμένη στην πλευρά ΥΤ του Μ/Σ

U_{nQ} : η ονομαστική τάση του συστήματος στο σημείο σύνδεσης Q της Μονάδας Ισχύος

U_{rG} : η ονομαστική τάση της γεννήτριας (πολική)

p_G : εκφράζει την διακύμανση της τάσης της γεννήτριας U_G ως προς την ονομαστική τάση αυτής U_{rG} (για δίκτυα XT με ανοχή $\pm 6\% / \pm 10\%$ ισχύει $p_{Gmax} = 0,06 / 0,1$ αντίστοιχα)

t_r : ο ονομαστικός λόγος μ/σ του μετασχηματιστή ($t_r = U_{rTLV} / U_{rTHV}$)

$1 \pm p_T$: ο όρος αυτός εισάγεται αν ο μ/σ διαθέτει μεταβλητές λήψεις εκτός φορτίου και μια από αυτές χρησιμοποιείται σε μόνιμη βάση αλλιώς επιλέγω $1 \pm p_T = 1$

– Σύγχρονη Γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης με ΣΑΤΥΦ (Μονάδα Ισχύος με ΣΑΤΥΦ)

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}}$$

$$Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV})$$

, όπου

\tilde{Z}_S : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση της μονάδος ισχύος (σύγχρονη γεννήτρια και Μ/Σ) ανηγμένη στην πλευρά YT του Μ/Σ

x_d'' : η σχετική υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας ($x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}}$ με $Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$)

x_T : η σχετική επαγωγική αντίδραση του Μ/Σ ($x_T = \frac{X_T}{Z_{rT}}$ με $Z_{rT} = \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$)

2.5.6 Ασύγχρονες Μηχανές

Ο ασύγχρονος κινητήρας αντικαθίσταται στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας από την σύνθετη αντίσταση \tilde{Z}_M , το μέτρο της οποίας δίνεται από την σχέση :

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

, όπου

U_{rM} : η ονομαστική τάση του κινητήρα

I_{rM} : το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα

S_{rM} : η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του κινητήρα [$S_{rM} = P_{rM} / (\cos \varphi_{rM})$]

I_{LR} / I_{rM} : ο λόγος του ρεύματος ακινητοποιημένου δρομέα προς το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα

Η ασύγχρονη μηχανή παρουσιάζει συγκρίσιμη συνεισφορά ρεύματος σφάλματος είτε σε κατάσταση λειτουργίας κινητήρα είτε σε κατάσταση γεννήτριας, για αυτό και μοντελοποιώ την ασύγχρονη γεννήτρια με την σύνθετη αντίσταση \tilde{Z}_M του ασύγχρονου κινητήρα ($\tilde{Z}_G = \tilde{Z}_M$) με τυπικές τιμές λόγου R_G / X_G και I_{LR} / I_{RG} ίσες με 0,1 και 8 αντίστοιχα.

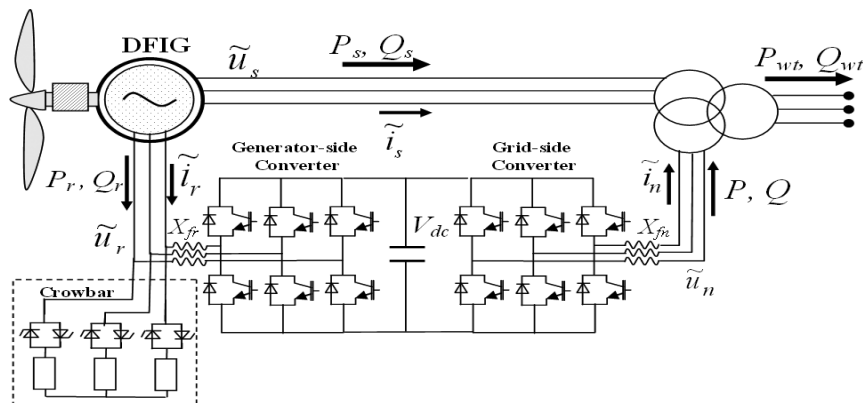
2.5.7 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος

Στην περίπτωση διασύνδεσης γεννήτριας στο δίκτυο διανομής μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, η γεννήτρια θεωρείται ως πηγή σταθερού ρεύματος σφάλματος, ίσου με k φορές το ονομαστικό ρεύμα αυτής [6] :

$$I_k'' = k I_{rG} = ct, \text{ για διάρκεια } \Delta t$$

,όπου Δt η χρονική διάρκεια που απαιτείται για την αποσύνδεση της γεννήτριας από την προστασία της (≈ 100 ms) και $k = 1,5 - 2,0$. Εάν παρεμβάλλεται και μετασχηματιστής το σταθερό ρεύμα σφάλματος I_k'' ανάγεται στο επίπεδο τάσης στην θέση σφάλματος μέσω του χαρακτηριστικού λόγου μ/σ αυτού.

Ειδική περίπτωση αποτελούν οι ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (Double Fed Induction Generators), οι οποίες παρά την παρουσία μετατροπέα στο κύκλωμα του δρομέα, παρουσιάζουν συγκρίσιμη συνεισφορά ρεύματος σφάλματος με τις απευθείας συνδεδεμένες ασύγχρονες γεννήτριες.



Σχήμα 2.6 Ηλεκτρικό μέρος ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης

Η μοντελοποίηση λοιπόν των Α/Γ διπλής τροφοδότησης μέσω της σύνθετης αντίστασης ασύγχρονης γεννήτριας ($Z_{DFIG} = Z_M$) δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια την συνεισφορά ρεύματος σφάλματος των DFIG.

2.5.8 Χωρητικότητες και Μη στρεφόμενα Φορτία

Όπως προαναφέρθηκε στο εδάφιο 2.4, το Πρότυπο IEC κατά τον υπολογισμό μέγιστου/ελάχιστου ρεύματος σφάλματος αμελεί τις χωρητικότητες και τις εγκάρσιες επιδεκτικότητες των γραμμών, εκτός αυτών του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, καθώς επίσης και τα μη στρεφόμενα φορτία (στατικά), διότι τα ρεύματα φορτίου είναι αμελητέα σε σύγκριση με τα ρεύματα σφάλματος.

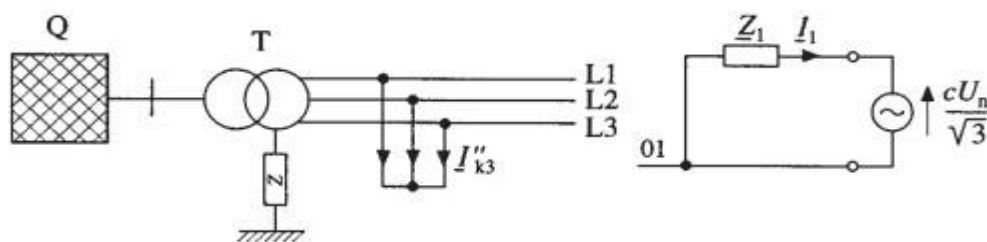
2.6 Αναλυτικός Υπολογισμός Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης

2.6.1 Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'')

Ο υπολογισμός του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος, I_k'' , κατά το Πρότυπο IEC 60909 γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου ισοδύναμης πηγής τάσης κατά την οποία αμελούνται τα προ του σφάλματος φορτία και η αντίσταση σφάλματος. Επομένως, οι αναλυτικές σχέσεις του αρχικού ρεύματος σφάλματος για κάθε τύπο σφάλματος προκύπτουν άμεσα από τις αντίστοιχες σχέσεις του εδαφίου 1.3, θεωρώντας στερεά γειωμένο δίκτυο ($Z_n = 0$), ιδανικό βραχυκύκλωμα ($Z_F = 0$) και αντικαθιστώντας την πηγή τάσης E_{a_1} με την ισοδύναμη πηγή τάσης $c U_n / \sqrt{3}$. Τα παραπάνω εφαρμόζονται στις επόμενες παραγράφους, κατά τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος για τριφασικό, μονοφασικό και διφασικό, με ή χωρίς γη, σφάλμα.

2.6.1.1 Τριφασικό σφάλμα

Για την διαστασιολόγηση του εξοπλισμού ενός Σ.Η.Ε είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του τριφασικού βραχυκυκλώματος για την εξασφάλιση της μηχανικής και θερμικής αντοχής του συστήματος καθώς και για την επιλογή των απαραίτητων μέσων προστασίας από υπερρεντάσεις. Το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος I_{k_3}'' για τριφασικό βραχυκύκλωμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, δίνεται από την σχέση (1.3.5) αντικαθιστώντας όπου E_{a_1} την ισοδύναμη πηγή τάσης $c U_n / \sqrt{3}$.



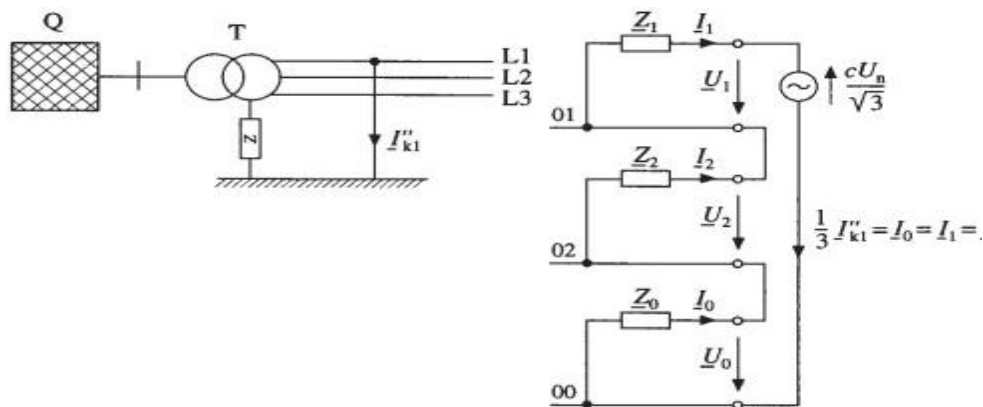
Σχήμα 2.7 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα θετικής ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα [3]

$$\mathbf{I}_{k_3}'' = \mathbf{I}_F \Big|_{E_{a1} = \frac{c U_n}{\sqrt{3}}} = \frac{E_{a1}}{Z_1} \Big|_{E_{a1} = \frac{c U_n}{\sqrt{3}}} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_1}$$

,όπου $Z_1 = Z_k = R_k + j X_k$ η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ θετικής ακολουθίας όπως φαίνεται από την θέση σφάλματος .

2.6.1.2 Μονοφασικό σφάλμα προς γη

Το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος I_{k_1}'' για μονοφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος, δίνεται από την σχέση (1.3.14) με $E_{a1} = c U_n / \sqrt{3}$ και $Z_n = 0$:

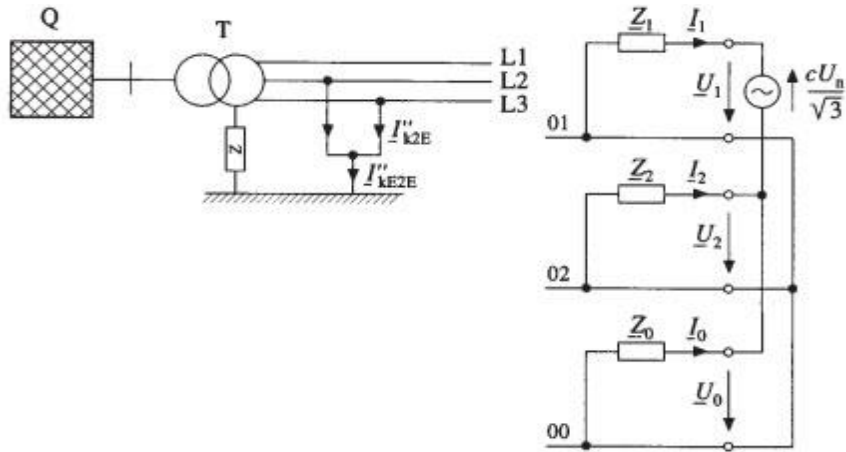


Σχήμα 2.8 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [3]

$$\tilde{\mathbf{I}}_{k_1}'' = 3 \frac{c U_n}{\sqrt{3} (Z_1 + Z_2 + Z_0)}$$

2.6.1.3 Διφασικό σφάλμα προς γη

Για τον υπολογισμό του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος είναι απαραίτητη η διάκριση μεταξύ των ρευμάτων $\tilde{\mathbf{I}}_{k_2 \text{ EL2}}''$, $\tilde{\mathbf{I}}_{k_2 \text{ EL3}}''$, $\tilde{\mathbf{I}}_{k_2 \text{ E2E}}''$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9 :



Σχήμα 2.9 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [3]

Οι σχέσεις που δίνουν τα επιμέρους ρεύματα σφάλματος είναι :

$$\tilde{I}_{k_{2EL2}}'' = -jcU_n \frac{Z_0 - aZ_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}$$

$$\tilde{I}_{k_{2EL3}}'' = -jcU_n \frac{Z_0 - a^2 Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}$$

$$I_{k_{E2E}}'' = I_{k_{2EL2}}'' + I_{k_{2EL3}}'' = -3 \frac{c U_n Z_2}{\sqrt{3} (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0)}$$

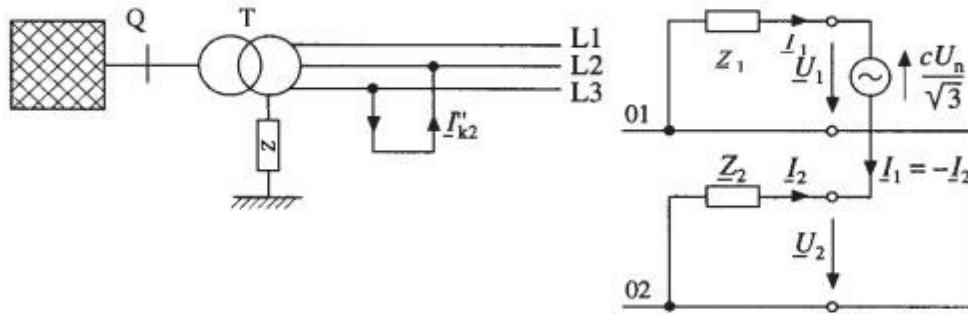
Θεωρώντας ότι το ανυσματικό άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων σφάλματος των φάσεων L2, L3 είναι περίπου ίσο με το αντίστοιχο αλγεβρικό ($I_{k_{E2E}}'' = I_{k_{2EL2}}'' + I_{k_{2EL3}}''$) και ότι $Z_1 = Z_2$ έχουμε :

$$I_{k_{2EL2}}'' = cU_n \frac{|Z_0/Z_1 - \tilde{a}|}{|Z_1 + 2Z_0|}, \quad I_{k_{2EL3}}'' = cU_n \frac{|Z_0/Z_1 - \tilde{a}^2|}{|Z_1 + 2Z_0|}$$

$$I_{k_{E2E}}'' = I_{k_{2EL2}}'' + I_{k_{2EL3}}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|Z_1 + 2Z_0|}$$

2.6.1.4 Διφασικό σφάλμα χωρίς γη

Το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος I_{k_2}'' για διφασικό σφάλμα χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος, δίνεται από την σχέση (1.3.54) με $E_{a1} = c U_n / \sqrt{3}$:



Σχήμα 2.10 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [3]

$$\tilde{I}_{k_2}'' = -j \frac{cU_n}{Z_1 + Z_2}$$

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC κατά τον υπολογισμό του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος I_k'' γίνεται γενικά η παραδοχή ότι $Z_1 = Z_2$, γεγονός που με αρκετή ακρίβεια ισχύει για τα βραχυκυκλώματα “μακριά” από γεννήτρια. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωτικά οι αναλυτικές σχέσεις που δίνουν το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος για κάθε τύπο σφάλματος, σύμφωνα με τις παραδοχές του Προτύπου IEC.

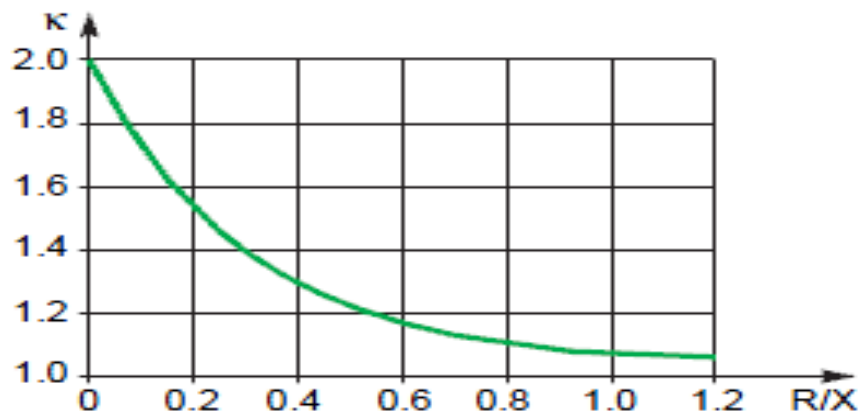
	Γενική Περίπτωση	Σφάλμα Μακριά από Γεννήτρια ($Z_1 = Z_2$)
Τύπος Σφάλματος	Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'')	Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'')
Τριφασικό (με ή χωρίς γη)	$I_{k_3}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_1}$	$I_{k_3}'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_1}$
Μονοφασικό	$I_{k_1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$	$I_{k_1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{ 2 Z_1 + Z_0 }$
Διφασικό με γη	$I_{k_{E2E}}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n Z_2}{ Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 }$	$I_{k_{E2E}}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{ Z_1 + 2 Z_0 }$
Διφασικό χωρίς γη	$I_{k_2}'' = \frac{c U_n}{ Z_1 + Z_2 }$	$I_{k_2}'' = \frac{c U_n}{2 Z_1 }$

Πίνακας 2.3 Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'') για κάθε τύπο σφάλματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60909

2.6.2 Μέγιστη τιμή Ρεύματος Βραχυκύκλωσης (I_p)

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_p προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα του I_{p_i} των επιμέρους κλάδων συνεισφοράς στο σφάλμα ($I_p = \sum_i I_{p_i}$). Η μέγιστη τιμή των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης I_{p_i} δίνεται ως συνάρτηση του αρχικού ρεύματος βραχυκύκλωσης I_k'' και ενός συντελεστή k : $I_{p_i} = k \sqrt{2} I_k''$

Ο συντελεστής k λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της φθίνουσας dc απειροδικής συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος και δίνεται (γραφικά ή αναλυτικά) ως συνάρτηση του λόγου R/X του εκάστοτε κλάδου: $k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3R}{X}}$



Σχήμα 2.11 Μεταβολή του συντελεστή k συναρτήσει του λόγου R/X [1]

Ο υπολογισμός της μέγιστης τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι απαραίτητος για την εκτίμηση των ηλεκτροδυναμικών δυνάμεων (καταπονήσεων) στις οποίες υποβάλλεται το ηλεκτρικό σύστημα.

2.6.3 Ρεύμα Διάσπασης (I_b)

Σύμφωνα με το Πρότυπο [5] το ρεύμα διάσπασης I_b ορίζεται ως η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος που ρέει κατά την απόξευση του πρώτου πόλου ενός διακόπτη ισχύος. Κατά τον υπολογισμό του ρεύματος διάσπασης γίνεται διάκριση μεταξύ σφάλματος “κοντά” και “μακριά” από την γεννήτρια:

- Σφάλμα “μακριά” από γεννήτρια ($I_k'' < 2I_{rG}$): Το ρεύμα διάσπασης λαμβάνεται ίσο με το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, $I_b = I_k''$.

- Σφάλμα “κοντά” στη γεννήτρια ($I_k'' > 2I_{rG}$): Το ρεύμα διάσπασης $I_b (= \sum_i I_{b_i})$ λαμβάνεται ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους συνεισφορών ρεύματος διάσπασης I_{b_i} , όπου: $I_{b_i} = \mu_i q_i I_k''$

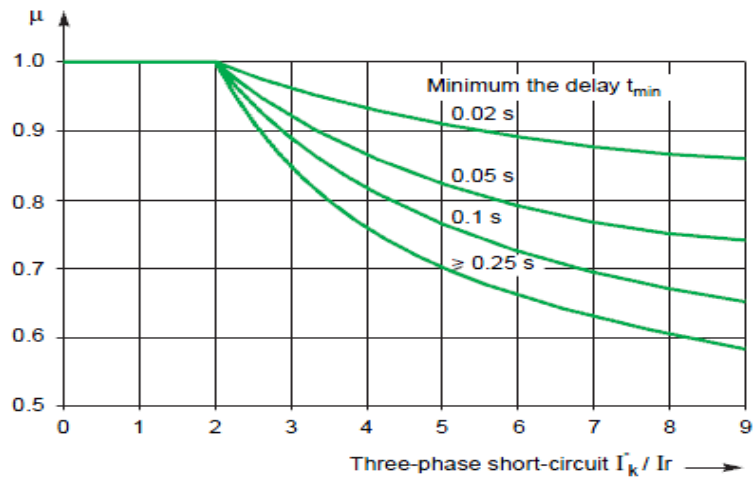
Ο συντελεστής μ_i προσδιορίζεται αναλυτικά ή γραφικά ως συνάρτηση του ελάχιστου χρόνου αποκοπής t_{min} και του λόγου I_k'' / I_{r_i} :

$$\mu = 0,84 + 0,26 e^{-0,26 (I_k''/I_r)}, \text{ για } t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 e^{-0,30 (I_k''/I_r)}, \text{ για } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 (I_k''/I_r)}, \text{ για } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 e^{-0,38 (I_k''/I_r)}, \text{ για } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$



Σχήμα 2.12 Μεταβολή του συντελεστή μ συναρτήσει των I_k''/I_r και t_{\min} [1]

Για εξωτερικά δίκτυα τροφοδότησης θεωρείται $\mu_i = 1$ και για όσους κλάδους δεν περιέχουν ασύγχρονους κινητήρες, $q_i = 1$. Ο συντελεστής q_i , στην περίπτωση συνεισφοράς στο σφάλμα από ασύγχρονους κινητήρες, δίνεται συναρτήσει του t_{\min} και της ενεργού ισχύος ανά ζεύγος πόλων m :

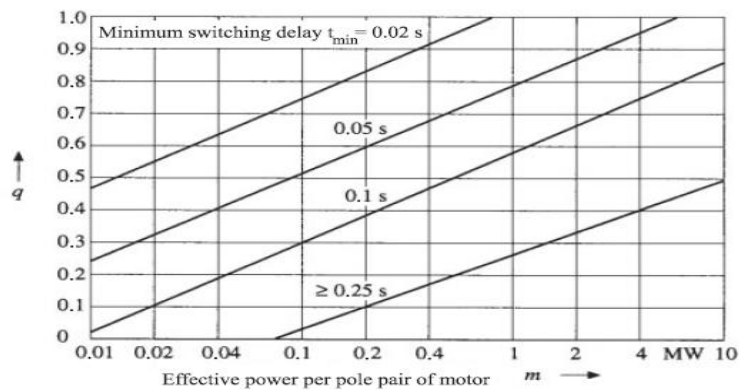
$$q = 1,03 + 0,12 \ln m, \text{ για } t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$q = 0,79 + 0,12 \ln m, \text{ για } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln m, \text{ για } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$q = 0,26 + 0,12 \ln m, \text{ για } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

$$\text{όπου } m = P_{rM} (MW)/p$$



Εικόνα 2.13 Μεταβολή του συντελεστή q συναρτήσει των παραμέτρων t_{\min} , m [3]

2.6.4 Ρεύμα Μόνιμης Κατάστασης (I_k)

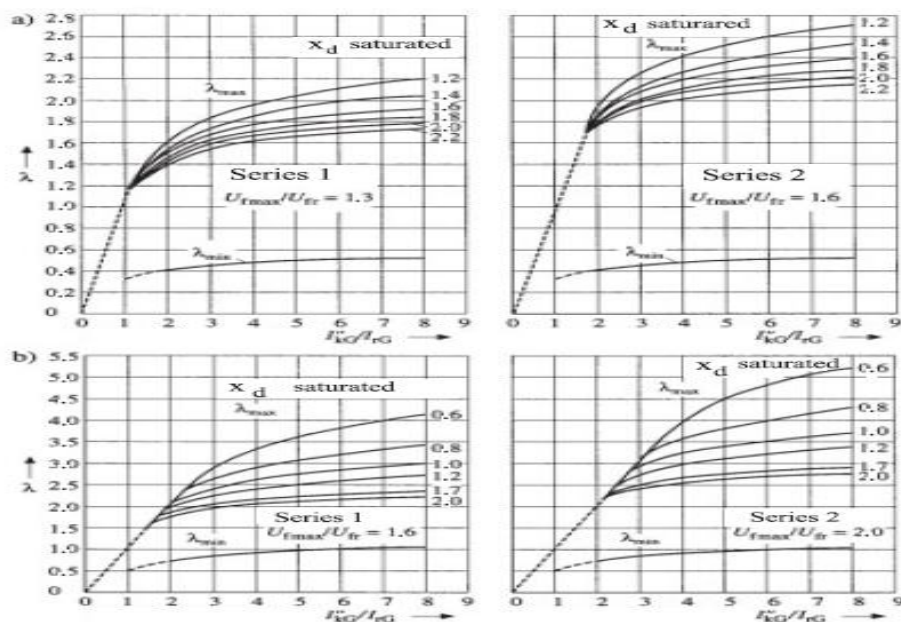
Ως ρεύμα μόνιμης κατάστασης I_k ορίζεται η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος μετά την εξασθένιση του μεταβατικού φαινομένου. Κατά τον υπολογισμό του ρεύματος μόνιμης κατάστασης γίνεται διάκριση μεταξύ σφάλματος “κοντά” και “μακριά” από την γεννήτρια :

- Σφάλμα “μακριά” από γεννήτρια ($I_k'' < 2I_{rG}$) : Το ρεύμα μόνιμης κατάστασης λαμβάνεται ίσο με το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, $I_k = I_k''$.
- Σφάλμα “κοντά” στη γεννήτρια ($I_k'' > 2I_{rG}$) : Σε αυτήν την περίπτωση για την εκτίμηση του ρεύματος I_k λαμβάνεται υπόψιν ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, ο βαθμός της διέγερσης και ο τύπος της μηχανής (κυλινδρικού δρομέα, εκτύπων πόλων). Το Πρότυπο [5] διακρίνει τις εξής δύο (2) τιμές για το ρεύμα μόνιμης κατάστασης :

$$I_{k\max} = \lambda_{\max} \cdot I_{rG} \quad (\text{μέγιστη διέγερση})$$

$$I_{k\min} = \lambda_{\min} \cdot I_{rG} \quad (\text{ελάχιστη διέγερση})$$

Οι ακραίες τιμές του συντελεστή λ δίνονται γραφικά (βλ.σχήμα) και εξαρτώνται από τον τύπο της μηχανής, την τάση διέγερσης, τον λόγο I_k'' / I_r , ενώ όσο αφορά το λ_{\max} επηρεάζεται και από την κορεσμένη τιμή της σύγχρονης αντίδρασης ευθέως άξονα $X_{d\text{ sat}}$.



Σχήμα 2.14 Συντελεστές λ_{\min} και λ_{\max} για τον υπολογισμό του ρεύματος μόνιμης κατάστασης I_k α) συνεισφορά από γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα β) συνεισφορά από γεννήτρια εκτύπων πόλων [3]

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή του Προτύπου ANSI C 37.010

3.1 Γενικά

Το πρότυπο ANSI αποτελεί έναν ευρύτατα διαδεδομένο οδηγό (guideline) στην Βόρειο Αμερική για την εκτίμηση της τιμής του αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, με άμεση εφαρμογή στην επιλογή των χαρακτηριστικών των μέσων προστασίας αυτού. Το Πρότυπο ANSI αποτελείται από την ομότιτλη έκδοση C 37.010 [12] για ηλεκτρικά συστήματα 1000V και άνω (MT / YT) καθώς και από την C 37.13 [13] για συστήματα κάτω των 1000 V (XT). Συμπληρωματικά με τα άνωθι πρότυπα το ANSI/IEEE Standard 141 (IEEE Red Book) [14] λειτουργεί ως οδηγός για την μελέτη, ερμηνεία και βαθύτερη κατανόηση των τελευταίων.

3.2 Απλοποιημένη Μέθοδος E / X

Το Πρότυπο ANSI C 37.010 προτείνει μια απλοποιημένη διαδικασία υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρικό σύστημα περιορίζεται σε ένα ισοδύναμο δίκτυο αποτελούμενο από μια ιδανική πηγή τάσης E πίσω από μια ισοδύναμη αντίδραση X. Το μέτρο της τάσης, E, είναι η μέγιστη δυνατή τιμή τάσης λειτουργίας στην θέση σφάλματος (προ του σφάλματος τάση), η οποία συνήθως θεωρείται ίση με την ονομαστική τάση ($E=1pu$). Η μέθοδος αυτή λοιπόν, περιορίζεται σε ένα απλό E/X υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος με ιδιαίτερη έμφαση στο συμμετρικό τριφασικό σφάλμα (E/X_1) και στο ασύμμετρο μονοφασικό σφάλμα προς γη ($3E / (2X_1 + X_0)$). Στα πλαίσια του Προτύπου, ορίζονται τέσσερις χαρακτηριστικές τιμές (duty types) του ρεύματος σφάλματος : (α) ρεύμα πρώτου κύκλου (first cycle duty), (β) στιγμιαίο ρεύμα (momentary/closing latching duty), (γ) ρεύμα διακοπής (interrupting/contact parting duty) και (δ) ρεύμα με χρονική καθυστέρηση (time delayed duty). Επίσης, το Πρότυπο δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της φθίνουσας ac και dc συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος των στρεφόμενων μηχανών (ac/dc component decrement), μέσω διορθωτικών συντελεστών, ενώ προβαίνει και σε κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων (τοπικά / απομακρυσμένα).

3.2.1 Μοντελοποίηση της AC / DC συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος

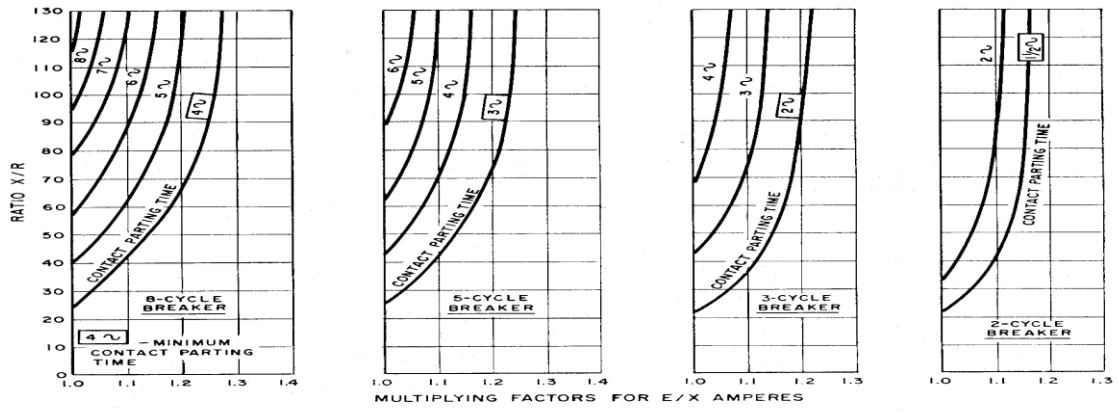
Η μοντελοποίηση της ac και dc συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος των στρεφόμενων μηχανών (γεννήτριες,κινητήρες) αποτελεί κρίσιμο ζήτημα ως προς την ακρίβεια υπολογισμού της τιμής αυτού. Συγκεκριμένα, η ac συνιστώσα οφείλεται στην τάση των στρεφόμενων μηχανών να αυξάνουν την επαγωγική τους αντίδραση με τον χρόνο ($X_d'' < X_d' < X_d$) ενώ η dc συνιστώσα συνδέεται με τον χαρακτηριστικό λόγο X/R του κυκλώματος σφάλματος και την ακριβή στιγμή διακοπής αυτού. Κατά τον υπολογισμό rms συμμετρικού ρεύματος σφάλματος (E/X) το Πρότυπο λαμβάνει υπόψιν την ac συνιστώσα εισάγοντας διορθωτικούς συντελεστές για τις αντιδράσεις των στρεφόμενων μηχανών. Οι διορθωτικοί αυτοί

συντελεστές δίνονται ως συνάρτηση του duty type του ρεύματος σφάλματος (ώστε να ληφθεί υπόψιν το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εκδήλωση του σφάλματος), το μέγεθος της μηχανής (HP) και την ταχύτητα αυτής (rpm), όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα.

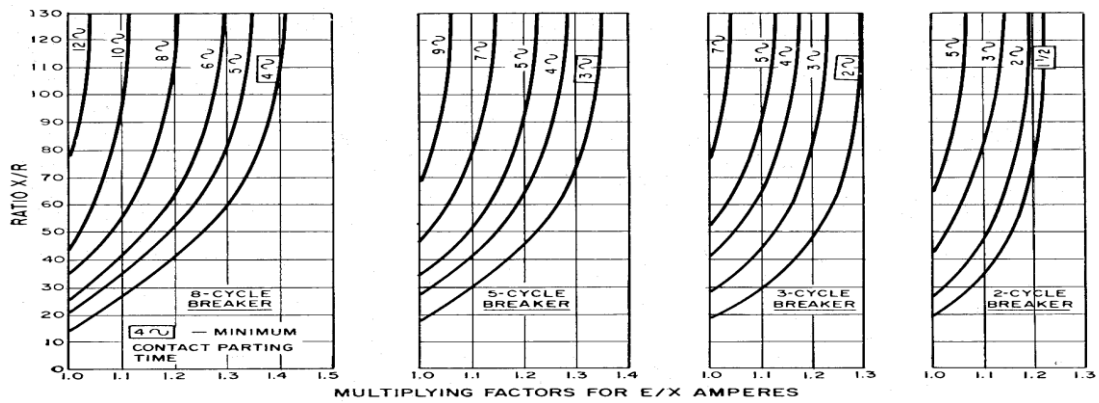
Τύπος Στρεφόμενης Μηχανής	Αντίδραση Θετικής Ακολουθίας (X_1)	
	Closing & Latching duty	Interrupting duty
Turbo – Γεννήτριες	1.0 X_d''	1.0 X_d''
Υδρογεννήτριες με τύλιγμα απόσβεσης		
Υδρογεννήτριες χωρίς τύλιγμα απόσβεσης	0.75 X_d''	0.75 X_d''
Σύγχρονες Γεννήτριες	1.0 X_d''	1.5 X_d''
Ασύγχρονοι Κινητήρες		
$P_n > 1000$ HP / $n \leq 1800$ rpm	1.0 X_d''	1.5 X_d''
$P_n > 250$ HP / $n = 3600$ rpm	1.0 X_d''	1.5 X_d''
$50 \leq P_n \leq 1000$ HP / $n \leq 1800$ rpm	1.2 X_d''	3.0 X_d''
$50 \leq P_n \leq 250$ HP / $n = 3600$ rpm	1.2 X_d''	3.0 X_d''
$P_n < 50$ HP	∞	∞
1Φ Ασύγχρονοι Κινητήρες	∞	∞

Πίνακας 3.1 Διορθωτικοί συντελεστές αντιδράσεων στρεφόμενων μηχανών

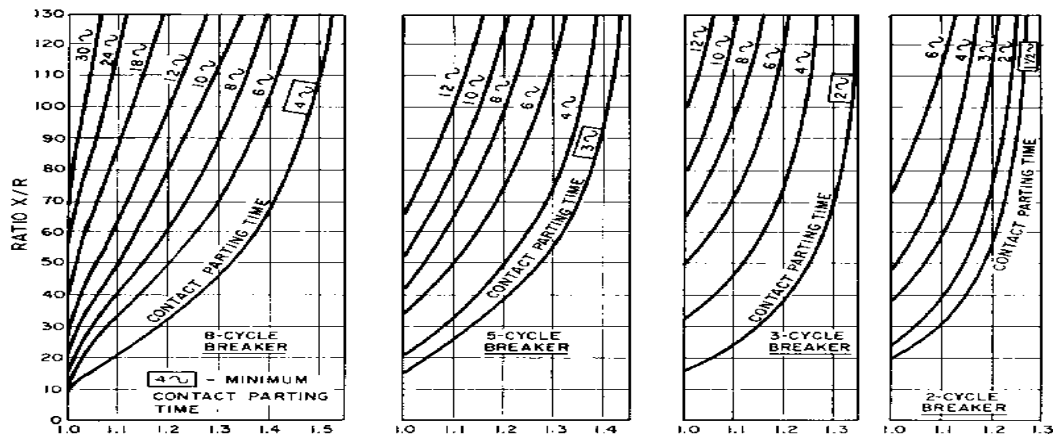
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως το Πρότυπο αμελεί τα μη στρεφόμενα φορτία (παθητικούς καταναλωτές) καθώς παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές αντιδράσεων από τις αντίστοιχες των κλάδων συνεισφοράς στο σφάλμα. Κατά τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής (interrupting duty), το Πρότυπο ANSI λαμβάνει υπόψιν την dc συνιστώσα διορθώνοντας μέσω συντελεστών το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (E/X), δίνοντας τελικά rms τιμή ασύμμετρου ρεύματος. Οι συντελεστές αυτοί δίνονται σε γραφική μορφή (βλ. σχήμα 3.1) και διαφέρουν ανάλογα με την τιμή του λόγου X/R , το είδος της συνεισφοράς σφάλματος (τοπική ή απομακρυσμένη) και τον χρόνο απόζευξης του διακόπτη ισχύος. Αναφορικά με τον προσδιορισμό της ακριβούς τιμής του λόγου X/R , που βλέπει η θέση σφάλματος, το Πρότυπο υιοθετεί την μέθοδο R/X κυκλώματος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή το αρχικό κύκλωμα σφάλματος διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους κυκλώματα τα οποία αποτελούνται αποκλειστικά από ωμικές αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις αντίστοιχα. Ο διαδοχικός υποβιβασμός των επιμέρους κυκλωμάτων οδηγεί σε μια τιμή ισοδύναμης αντίστασης R και αντίδρασης X , δίνοντας τελικά το λόγο X/R του συστήματος. Με την παραπάνω μέθοδο εξασφαλίζεται τιμή λόγου X/R στην ασφαλή πλευρά λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση των πολυάριθμων σταθερών χρόνου που επικρατούν κατά την τροφοδότηση του σφάλματος από περισσότερες από μία πηγές.



Σχήμα 3.2 Διορθωτικοί συντελεστές για τριφασικό σφάλμα με επίδραση της ac και dc συνιστώσας [$X_{ext} < 1.5 X_{d''}$]



Σχήμα 3.3 Διορθωτικοί συντελεστές για μονοφασικό σφάλμα με επίδραση της ac και dc συνιστώσας [$X_{ext} < 1.5 X_{d''}$]



Σχήμα 3.4 Διορθωτικοί συντελεστές για τριφασικό και μονοφασικό σφάλμα με επίδραση της dc συνιστώσας [$X_{ext} \geq 1.5 X_{d''}$]

Το Πρότυπο ANSI κατηγοριοποιεί τις συνεισφορές ρεύματος σφάλματος με βάση την αντίδραση που μεσολαβεί μεταξύ της πηγής σφάλματος (γεννήτριες) και της θέσης σφάλματος (X_{ext}). Συγκεκριμένα, ως 'τοπικές' ορίζονται οι συνεισφορές ρεύματος που τροφοδοτούν το σφάλμα μέσω εξωτερικής αντίδρασης (X_{ext}) μικρότερης από 1,5 φορά την υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας (X_d''), ενώ ως 'απομακρυσμένες' αυτές με εξωτερική αντίδραση (X_{ext}) τουλάχιστον ίση με 1,5 φορά την υπομεταβατική αντίδραση (X_d'').

3.2.2 Χαρακτηριστικές τιμές του ρεύματος σφάλματος

Όπως προαναφέρθηκε, το Πρότυπο ANSI C 37.010 διακρίνει τέσσερις (4) βασικές χαρακτηριστικές τιμές (duty types) του ρεύματος σφάλματος :

- (α) ρεύμα πρώτου κύκλου (first cycle duty)
- (β) στιγμιαίο ρεύμα (momentary/closing latching duty)
- (γ) ρεύμα διακοπής (interrupting/contact parting duty) και
- (δ) ρεύμα με χρονική καθυστέρηση (time delayed duty)

Για τον υπολογισμό καθεμιάς από τις τέσσερις προαναφερθείσες χαρακτηριστικές τιμές ρεύματος σφάλματος σύμφωνα με το Πρότυπο, απαιτείται η κατασκευή αντίστοιχου δικτύου όπως περιγράφεται ακολούθως :

(α),(β) Για την εκτίμηση του στιγμιαίου ρεύματος (momentary) απαιτείται προηγουμένως ο υπολογισμός του ρεύματος 'πρώτου κύκλου' (first cycle current). Το first cycle duty ρεύμα είναι το rms συμμετρικό ρεύμα που υπολογίζεται μισό κύκλο μετά την εκδήλωση του σφάλματος και το οποίο επιτρέπει την εκτίμηση της καταπόνησης του διακόπτη ισχύος κατά την διάρκεια του πρώτου κύκλου. Για τον υπολογισμό του απαιτείται η κατασκευή του δικτύου 'πρώτου κύκλου' (first cycle network) το οποίο αγνοεί την αντίσταση των στατικών φορτίων και κάνει χρήση των διορθωμένων υπομεταβατικών αντιδράσεων των στρεφόμενων μηχανών (βλ.πίνακα 3.1), λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της φθίνουσας ac συνιστώσας. Εφαρμόζοντας την μέθοδο R/X κυκλώματος προσδιορίζεται, μετά από διαδοχικούς υποβιβασμούς, η ισοδύναμη αντίδραση X του κυκλώματος με το ρεύμα 'πρώτου κύκλου' να δίνεται από την σχέση E/X (rms συμμετρική τιμή). Αν ο λόγος X/R στην θέση σφάλματος είναι μεγαλύτερος από 15 τότε λόγω της έντονης ασυμμετρίας υπολογίζεται το στιγμιαίο ρεύμα (momentary current) το οποίο ορίζεται ως η rms τιμή του ασύμμετρου ρεύματος σφάλματος 0,5 κύκλο μετά την έναρξη του σφάλματος. Το στιγμιαίο ρεύμα προκύπτει από το ρεύμα 'πρώτου κύκλου' επί το συντελεστή 1,6. Το Πρότυπο ANSI δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή αναγωγής μέσω αναλυτικής σχέσης :

$$I_{rms,asym} = \sqrt{I_{ac,rms,sym}^2 + I_{dc}^2} = I_{ac,rms,sym} \sqrt{1.0 + 2.0e^{-(4\pi t \frac{R}{X})}}$$

$$M.fr = \sqrt{1.0 + 2.0e^{-(4\pi t \frac{R}{X})}}, \text{ όπου } t = 1/2 \text{ cycle}$$

Αναφορικά με την διαστασιολόγηση και επιλογή των διακοπών ισχύος σε ηλ. δίκτυα κάτω των 1000V, το Πρότυπο ANSI /IEEE Std 141 (Red Book) επιτρέπει την χρήση του στιγμιαίου δικτύου (momentary network) για την μοντελοποίηση του δικτύου χαμηλής τάσης (low voltage network) προσεγγίζοντας το low voltage circuit breaker duty ρεύμα.

(γ) Το Πρότυπο ορίζει το ρεύμα διακοπής (interrupting current) ως το rms ασύμμετρο ρεύμα σφάλματος το οποίο βλέπει ο διακόπτης μέσης/υψηλής τάσης κατά την απόξευση των πόλων του, λίγους κύκλους μετά το σφάλμα. Σε πρώτη φάση υπολογίζεται το rms συμμετρικό ρεύμα διακοπής το οποίο στην συνέχεια διορθώνεται μέσω συντελεστών που λαμβάνουν την επίδραση της φθίνουσας ac και dc συνιστώσας, δίνοντας τελικά το rms ασύμμετρο ρεύμα διακοπής (interrupting current). Για τον υπολογισμό του rms συμμετρικού ρεύματος διακοπής απαιτείται η κατασκευή του αντίστοιχου κυκλώματος διακοπής (interrupting network) κατά την οποία οι αντιδράσεις των στρεφόμενων μηχανών διορθώνονται (βλ.πίνακα 3.1), ώστε να ληφθεί υπόψιν η απομείωση της ac συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος με το χρόνο. Ο προσδιορισμός λοιπόν, της rms τιμής του συμμετρικού ρεύματος διακοπής γίνεται με απλό $I = E/X$ υπολογισμό, όπου X : η ισοδύναμη αντίδραση που 'βλέπει' το σφάλμα και E : η προ του σφάλματος φασική τάση στην θέση σφάλματος. Για την εκτίμηση του rms ασύμμετρου ρεύματος διακοπής το Πρότυπο ANSI C 37.010 παρέχει συντελεστές διόρθωσης, υπό μορφή γραφημάτων (βλ.Σχήματα 3.2 – 3.4), του αντίστοιχου rms συμμετρικού ρεύματος λαμβάνοντας υπόψιν την μειούμενη με το χρόνο ac και dc συνιστώσα αυτού. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τον λόγο X/R στην θέση σφάλματος, την τοπικότητα ή μη των πηγών ρεύματος σφάλματος (local/remote) καθώς και από το χρόνο απόξευξης του διακόπτη ισχύος (contact parting time).

(δ) Σύμφωνα με το Πρότυπο το ρεύμα με χρονική καθυστέρηση (time delayed current) ορίζεται ως το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος αρκετούς κύκλους μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος (> 30 κύκλους), όπου οι συνεισφορές των κινητήρων έχουν εξαλειφθεί και οι γεννήτριες εμφανίζουν τις μεταβατικές ή και σύγχρονες τιμές των αντιδράσεων τους. Για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος με χρονική καθυστέρηση απαιτείται η υλοποίηση του αντίστοιχου κυκλώματος (time delayed network). Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει τις αντιδράσεις των γεννητριών (μεταβατικές ή σύγχρονες), παθητικά στοιχεία (γραμμές μεταφοράς, καλώδια και μετασχηματιστές) ενώ αμελούνται οι κινητήρες καθώς η συνεισφορά τους στο ρεύμα σφάλματος έχει αποσβεστεί. Μετά τον διαδοχικό υποβιβασμό του άνω κυκλώματος προσδιορίζεται η τιμή της ισοδύναμης αντίδρασης X που 'βλέπει' το σφάλμα και συνεπώς το E/X ρεύμα χρονικής καθυστέρησης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθούν τα εξής :

- Η ισοδύναμη αντίδραση X και αντίσταση R που 'βλέπει' το σφάλμα προκύπτει από διαδοχικό υποβιβασμό ξεχωριστού κυκλώματος αντιδράσεων και αντιστάσεων αντίστοιχα (τεχνική R/X κυκλώματος), ώστε να ληφθούν υπόψιν οι πολυάριθμες σταθερές χρόνου (X/R) στην περίπτωση τροφοδότησης του σφάλματος από περισσότερες της μιας πηγές ρεύματος σφάλματος.
- Το Πρότυπο ANSI επιτρέπει τον υπολογισμό των ως άνω χαρακτηριστικών τιμών του ρεύματος σφάλματος (duty types) αντικαθιστώντας όπου X το μέτρο της σύνθετη αντίστασης, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

3.3 Συγκριτική αντιπαράθεση Προτύπων IEC 60909 και ANSI C 37.010

Στο διεθνές πρότυπο IEC 60909 ορίζονται οι εξής τύποι ρεύματος σφάλματος κατά την χρονική εξέλιξη ενός βραχυκυκλώματος [5] :

1. Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος (I_k'') : είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (initial symmetrical fault current) το οποίο ρέει την στιγμή του σφάλματος, θεωρώντας τις υπομεταβατικές αντιδράσεις των μηχανών.
2. Μέγιστο Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (I_p) : είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος σφάλματος (maximum asymmetrical fault current) μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος.
3. Ρεύμα Διάσπασης (I_b) : είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (breaking fault current) το οποίο ρέει στην πρώτη φάση κατά την στιγμή απόξευξης του διακόπτη ισχύος και άρα εξαρτάται από την χρονική καθυστέρηση του διακόπτη ισχύος.
4. Ρεύμα Μόνιμης Κατάστασης (I_k) : είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (steady state fault current) μετά την εξασθένηση όλων των μεταβατικών του σφάλματος, αμελώντας την dc συνιστώσα που συνεισφέρουν οι γεννήτριες.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ANSI/IEEE C 37.010 ορίζονται οι εξής τέσσερις (4) τύποι ρεύματος σφάλματος [12] [22] :

1. Ρεύμα Πρώτου Κύκλου (first cycle time duty) : είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος μισό κύκλο από την εμφάνιση του σφάλματος (first cycle current).
2. Στιγμιαίο Ρεύμα (closing-latching time duty) : είναι το rms ασύμμετρο ρεύμα σφάλματος μισό κύκλο από την εμφάνιση του σφάλματος. Το ρεύμα αυτό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της δυνατότητας του διακόπτη ισχύος να παραμένει κλειστός (closing and latching) κατά το σφάλμα μέχρι να πυροδοτηθεί.

3. Ρεύμα Διακοπής (contact-parting time duty) : το rms ασύμμετρο ρεύμα σφάλματος το οποίο βλέπει ο διακόπτης μέσης/υψηλής τάσης κατά την αποκοπή του, λίγους κύκλους μετά το σφάλμα.
4. Ρεύμα με Χρονική Καθυστέρηση (time delay duty) : είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος το οποίο υπολογίζεται αρκετούς κύκλους μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος (> 30 κύκλους), όπου οι συνεισφορές των κινητήρων έχουν εξαλειφθεί και οι γεννήτριες εμφανίζουν τις μεταβατικές ή και σύγχρονες τιμές των αντιδράσεων τους.

Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει την αντιστοιχία των διαφόρων τύπων ρεύματος σφάλματος ανάμεσα στα πρότυπα IEC / ANSI καθώς και την μορφή του αντίστοιχου ρεύματος σφάλματος (συμμετρική, ασύμμετρη).

IEC 60909		ANSI C 37.010	
Duty type	Μορφή RMS Ρεύματος	Duty type	Μορφή RMS Ρεύματος
initial	symmetrical	first cycle	symmetrical
peak	asymmetrical	closing latching	asymmetrical
break	symmetrical	contact parting	asymmetrical
steady state	symmetrical	time delay	symmetrical

Πίνακας 3.1 Τύποι και μορφή ρευμάτων σφάλματος κατά IEC/ ANSI

Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης

4.1 Βασική ορολογία

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές που διέπουν την σχεδίαση ενός τυπικού συστήματος γείωσης, σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [15]. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αρχικά σκόπιμη η αναφορά και επεξήγηση της βασικής ορολογίας που χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία σχεδίασης ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης.

Γείωση (Ground) : η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιας έκτασης που να θεωρείται γη.

Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) : το τοποθετημένο μέσα στο έδαφος ηλεκτρόδιο μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη.

Αγωγός γείωσης : ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης

Κύριος Ακροδέκτης ή Ζυγός γείωσης : ο ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης και οι αγωγοί προστασίας

Διάταξη/Σύστημα γείωσης (Grounding system) : το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης αποτελούν τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης γείωσης

Πλέγμα γείωσης (grounding grid) : σύστημα οριζόντιων ηλεκτροδίων γείωσης που αποτελείται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων, γυμνών αγωγών τοποθετημένων στη γη, παρέχοντας μια κοινή γείωση για ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές, συνήθως σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Ένα τυπικό πλέγμα συνήθως συμπληρώνεται από έναν αριθμό ράβδων, και μπορεί να συνδεθεί σε βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να ελαττωθεί η αντίσταση του πλέγματος .

Άπειρη γη : ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε “άπειρη απόσταση” από το γειωτή το οποίο λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται μηδενική. Για πρακτικούς λόγους η “άπειρη απόσταση” είναι 5-10 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάσταση του γειωτή.

Αντίσταση γείωσης (R_g) : η ωμική αντίσταση του συστήματος γείωσης προς την άπειρη γη. Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση ρ του εδάφους όπου είναι εγκατεστημένη η γείωση, την επιφάνεια A που η γείωση καταλαμβάνει καθώς και το βάθος h όπου είναι τοποθετημένη. Ένα καλό σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση προς γη με στόχο μικρή ανύψωση δυναμικού γης. Συνήθεις τιμές για μεγάλους υποσταθμούς είναι μικρότερες του 1Ω και για υποσταθμούς διανομής από 1 ως 5Ω .

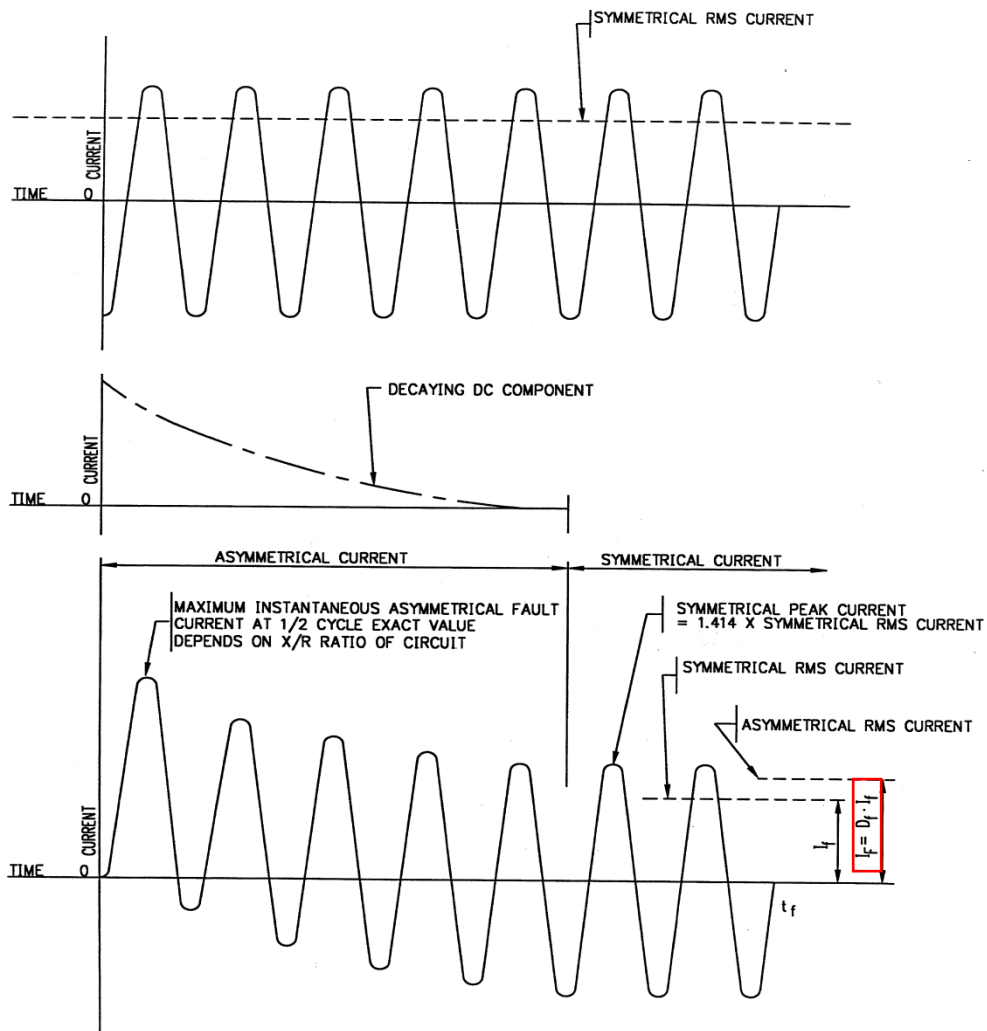
Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (I_F) : Προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή εξασθένησης D_f επί την ενεργό τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος I_f (Σχήμα 4.1) :

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (4.1)$$

όπου I_F : ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (A)

I_f : ενεργό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (A)

D_f : συντελεστής εξασθένησης



Σχήμα 4.1 Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος – dc offset – Συνολικό ρεύμα σφάλματος [15]

Ενεργό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (I_f) : είναι η μέγιστη ενεργός (rms) τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος αμέσως μετά την εκδήλωση του σφάλματος προς γη ($t=0^+$). Συνεπώς, εκφράζει την rms τιμή της συμμετρικής συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος 0,5 κύκλο μετά την εμφάνιση του σφάλματος. Για ασύμμετρα σφάλματα προς γη δίνεται από την σχέση (Σχήμα 4.1) :

$$I_{f(0^+)} = 3 I_0'' \quad (4.2)$$

,όπου $I_{f(0^+)}$: αρχικό rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη

I_0'' : rms τιμή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας που ρέει αμέσως μετά την εκδήλωση του σφάλματος, εκφράζοντας τις υπομεταβατικές αντιδράσεις των στρεφόμενων μηχανών που συνεισφέρουν στο σφάλμα

Συντελεστής εξασθένησης (D_f) : συντελεστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του rms μη συμμετρικού ρεύματος σφάλματος I_F για μια δεδομένη διάρκεια σφάλματος t_f , εκφράζοντας την φθίνουσα της dc συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος .

DC συνιστώσα (dc offset) : η διαφορά του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος από το συνολικό ασύμμετρο ρεύμα. Πρόκειται για έναν παράγοντα ενιαίας και σταθερής πολικότητας το πλάτος του οποίου μειώνεται χρονικά με ρυθμό ανάλογο του λόγου R/X (Σχήμα 4.1).

Λόγος X/R : ο λόγος της αντίδρασης προς την αντίσταση του συστήματος,όπως φαίνεται από την θέση σφάλματος. Είναι ενδεικτικός του βαθμού εξασθένησης της dc συνιστώσας. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλος λόγος X/R αντιστοιχεί σε μεγάλη χρονική σταθερά και άρα αργή εξασθένηση της dc συνιστώσας.

Συμμετρικό ρεύμα πλέγματος (I_g) : Το μέρος του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη I_f που διαχέεται στο έδαφος μέσω του πλέγματος γείωσης

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (4.3)$$

,όπου I_g : το rms συμμετρικό ρεύμα πλέγματος (A)

I_f : το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη (A)

S_f : ο συντελεστής καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος

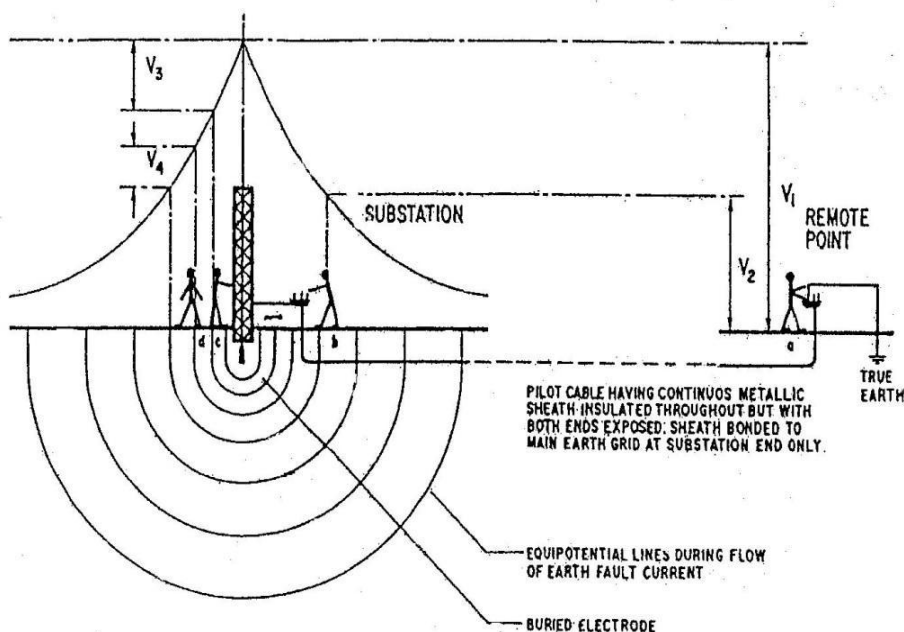
Μέγιστο ρεύμα πλέγματος (I_G): η μέγιστη τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος I_g , που διαρρέει το σύστημα γείωσης. Δίνεται από την σχέση :

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (4.4)$$

Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise) : το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που ένα πλέγμα γείωσης υποσταθμού μπορεί να λάβει σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο υποτίθεται ότι έχει το δυναμικό της απόμακρης γης. Αυτή η τάση, GPR, είναι ίση με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος I που διαρρέει το πλέγμα και της αντίστασης της γείωσης :

$$GPR = Z \cdot I \quad (4.5)$$

Όπου Z είναι η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης, όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Η σύνθετη αντίσταση Z συνίσταται από τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το δίκτυο γείωσης. Σε χαμηλές συχνότητες και για δίκτυα γείωσης που είναι σχετικά μικρού μεγέθους, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αγωγών του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί κατά τον υπολογισμό του Z .



Σχήμα 4.2 Βηματική τάση, τάση επαφής, μεταφερόμενη τάση

Τάση επαφής (Touch voltage) : Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή. Στο Σχήμα 4.2 το άτομο c χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της τάσης επαφής. Η διαφορά δυναμικού V_3 που “βλέπει” το σώμα είναι το αποτέλεσμα επαφής ενός χεριού με τα δύο πόδια. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, διότι η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς.

Τάση πλέγματος (Mesh voltage) : Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης .

Βηματική τάση (Step voltage) : Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος $1m$, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Στο Σχήμα 4.2 το άτομο d χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της βηματικής τάσης.

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage) : Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι.

Μεταφερόμενη τάση (Transferred voltage) : Ειδική περίπτωση της τάσης επαφής, όπου μια τάση μεταφέρεται προς ή από τον υποσταθμό ή σε ένα απόμακρο σημείο εξωτερικό της τοποθεσίας του υποσταθμού. Στο Σχήμα 1.1 το άτομο d χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του υψηλού δυναμικού που μεταφέρεται σε μια περιοχή μηδενικού δυναμικού μέσω του σπλισμού μιας κεραίας. Τα μεταφερόμενα δυναμικά θεωρείται ότι είναι τα πιο επικίνδυνα, διότι η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο δύναται να είναι ίση με την πλήρη ανύψωση δυναμικού (GPR) και όχι με κλάσμα της, όπως στην περίπτωση της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής.

Υλικό επιφανείας (surface material) : είναι ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από πέτρα, χαλίκι, άσφαλτο, ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την ειδική αντίστασή του ρ_s , μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα για την τάση επαφής και τη βηματική τάση που αφορούν τα πόδια του ανθρώπου.

Ενεργό μήκος (effective length) : Το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού δίνεται από την ακόλουθη σχέση [16]:

$$l_e = 1,4 \cdot \sqrt{\rho T} \quad (4.6)$$

,όπου ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

T : ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε μsec

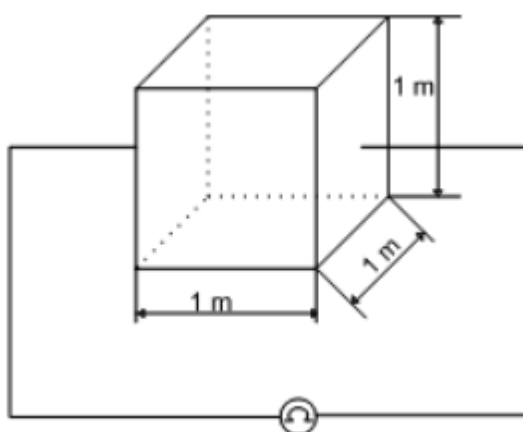
Το ενεργό μήκος ενός αγωγού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης όταν αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για λόγους αντικεραυνικής προστασίας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας.

4.2 Ειδική αντίσταση του εδάφους

4.2.1 Ορισμός ειδικής αντίστασης

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και κυρίως η ειδική αντίσταση (ρ) αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την τιμή της αντίστασης γείωσης. Επομένως, για να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό σύστημα γείωσης, είναι απαραίτητη η μελέτη της ειδικής αντίστασης του εδάφους για την επιλογή του καταλληλότερου και οικονομικότερου εξοπλισμού εγκατάστασης.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση, από το υλικό του εδάφους, που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Ειδική αντίσταση του εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εδαφών (π.χ. εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή κλπ), με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ , μετρούμενη συνήθως σε Ωm . Στον πίνακα 4.1 φαίνεται η ειδική αντίσταση ρ για διάφορους τύπους εδάφους.

Τύπος Εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ (Ωm)
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρα χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

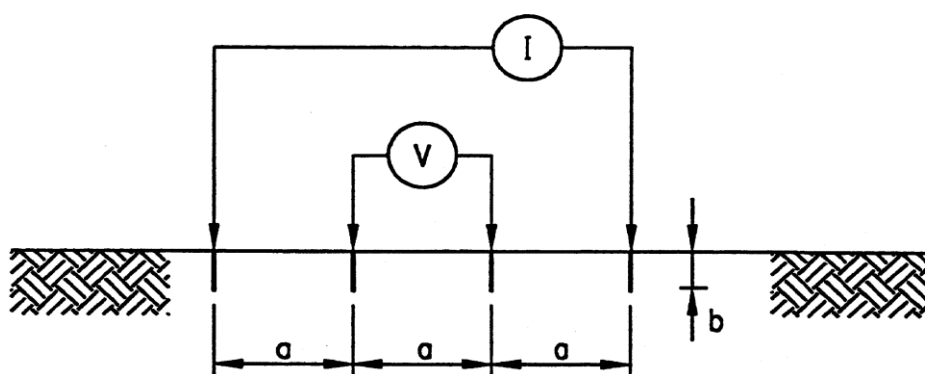
Πίνακας 4.1 Ενδεικτικές μέσες τιμές ειδικής αντίστασης εδαφών κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε [17]

4.2.2 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Στην διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία [15, 18] υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με βασικότερες τις :

- Μέθοδος των 4 σημείων (Four point method ή Wenner Method)
- Μέθοδος των 3 σημείων (Three point method ή Variation of Depth Method)
- Μέθοδος των 2 σημείων (Two Point Method).

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή των 4 σημείων (Wenner) καθώς θεωρείται η πλέον ακριβής για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ . Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τυπική διάταξη μέτρησης της μεθόδου των 4 σημείων (Wenner).



Σχήμα 4.4 : Διάταξη μέτρησης της μεθόδου Wenner

Η τυπική διάταξη μέτρησης της μεθόδου Wenner αποτελείται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3, από τέσσερα (4) ηλεκτρόδια θαμμένα στο έδαφος σε βάθος b , σε ευθεία και ίση απόσταση a μεταξύ τους. Ρεύμα δοκιμής I επιβάλλεται στα δύο εξωτερικά (ακραία) ηλεκτρόδια και μετρείται η διαφορά δυναμικού V μεταξύ των δύο εσωτερικών (ενδιαμέσων) ηλεκτροδίων. Το πηλίκο V/I δίνει τη φαινόμενη αντίσταση R , σε Ω . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ δίνεται από την σχέση [18,19]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4.7)$$

Όταν $a \gg b$ τότε η ειδική αντίσταση ρ του εδάφους που αντιστοιχεί σε απόσταση a ηλεκτροδίων, δίνεται από την προσεγγιστική σχέση :

$$\rho \cong 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R \quad (4.8)$$

4.2.3 Καθορισμός της δομής του εδάφους

Κατόπιν πληθώρας μετρήσεων προέκυψε ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους (πλήθος, πάχος και ειδική αντίσταση κάθε στρώματος του εδάφους). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική και τριστρωματική δομή του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [16, 18, 20]. Στην συνέχεια περιγράφεται ενδεικτικά το πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων για διστρωματική προσέγγιση του εδάφους.

Η διστρωματική προσέγγιση εδάφους συνεπάγεται ουσιαστικά την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Επομένως, ο προσδιορισμός των τριών παραμετρών του διστρωματικού μοντέλου εδάφους (h_1 το πάχος του πάνω στρώματος, ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους, ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους) προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g :

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (4.9)$$

,όπου ρ_{ai}^m είναι η i -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση a μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων, ενώ ρ_{ai}^c είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση a μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων, που αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης το διστρωματικό μοντέλο κάνει χρήση των ακόλουθων εξισώσεων [16, 18, 20] :

$$\rho_a^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (4.10)$$

, όπου

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.11)$$

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$B = A + 3 \quad (4.13)$$

4.3 Καθορισμός ορίων ασφαλείας

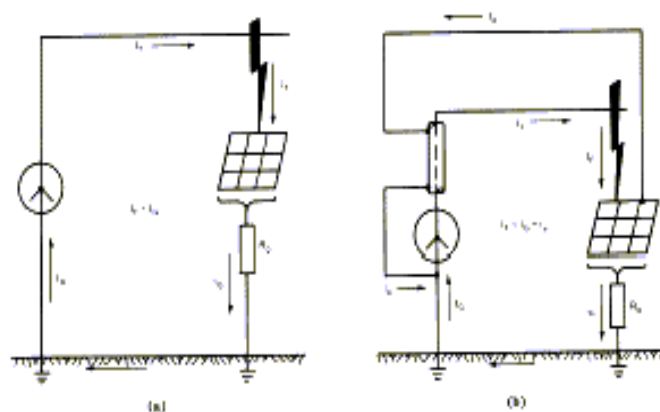
Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2000 ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης έχει ως στόχο :

- Να παρέχει δίοδο στο ηλεκτρικό ρεύμα προς τη γη, και σε κανονικές και σε συνθήκες σφάλματος, χωρίς να προκαλεί υπέρβαση των ορίων λειτουργίας του εξοπλισμού του υποσταθμού.
- Να εξασφαλίζει ότι ένας άνθρωπος στην περιοχή της γείωσης δεν εκτίθεται στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται εκτενής ανάλυση αναφορικά με τη δεύτερη προϋπόθεση, που καθιστά ένα σύστημα γείωσης αποτελεσματικό.

4.3.1 Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα

Κατά τη διάρκεια ενός τυπικού σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς τη γη θα παράγει ανυψώσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και γύρω από αυτόν. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την παραπάνω περίπτωση για έναν υποσταθμό με απλό ορθογώνιο πλέγμα γείωσης σε ομοιογενές έδαφος. Εάν δεν ληφθούν προφυλάξεις στο σχεδιασμό της γείωσης, οι μέγιστες κλίσεις δυναμικού στην επιφάνεια της γης μπορεί να έχουν αρκετά μεγάλη τιμή κατά τη διάρκεια σφάλματος προς γη, ώστε να τεθεί σε κίνδυνο άτομο που βρίσκεται στην περιοχή. Επιπλέον, επικίνδυνες τάσεις μπορεί να αναπτυχθούν ανάμεσα σε γειωμένες κατασκευές ή περιβλήματα εξοπλισμών και της κοντινής γης.



Σχήμα 4.5 Ισοδυναμικές καμπύλες ενός τυπικού πλέγματος γείωσης, με ή χωρίς ηλεκτρόδια γείωσης [15]

Οι συνθήκες υπό τις οποίες είναι πιθανό ένα ατύχημα ηλεκτροπληξίας είναι οι εξής:

- Σχετικά μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την περιοχή του συστήματος γείωσης και την αντίστασή του ως προς απόμακρη γη.
- Η ειδική αντίσταση του εδάφους και η κατανομή των ρευμάτων γης, που προκαλούν υψηλές κλίσεις δυναμικού σε σημεία στην επιφάνεια του εδάφους.
- Η παρουσία ατόμου σε τέτοιο σημείο, στιγμή και στάση ώστε το σώμα του γεφυρώνει δυο σημεία μεγάλης διαφοράς δυναμικού.
- Η απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής, ή άλλης αντίστασης σε σειρά, για να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το σώμα σε μια ασφαλή τιμή, όταν πληρούνται οι συνθήκες i έως iii.
- Η διάρκεια του σφάλματος και της επαφής με το σώμα, και συνεπώς της ροής του ρεύματος μέσα στο σώμα, για επαρκή χρόνο ώστε να προκαλέσει τραυματισμό του ατόμου, για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Τα όρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης, καθορίζονται από το συνδυασμό τιμών των διαφόρων παραμέτρων που προκαλούν τραυματισμό στο άτομο. Οι παράμετροι αυτές είναι:

1) Συχνότητα (f) ρεύματος : Η επίδραση του ρεύματος στον άνθρωπο είναι σημαντική σε συχνότητες 50Hz ή 60Hz. Στις συγκεκριμένες συχνότητες, ρεύματα έντασης περίπου 0.1A μπορεί να προκαλέσουν τον θάνατο. Σε ορισμένες περιπτώσεις το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αντέξει πολύ μεγάλα ρεύματα που οφείλονται σε κεραυνική τάση.

2) Ένταση (I_B) και διάρκεια (t_s) ρεύματος : Ρεύμα έντασης 1mA θεωρείται το κατώτατο όριο που γίνεται αντιληπτό. Ρεύματα έντασης 1-6mA, που συχνά αναφέρονται ως διαφεύγοντα ρεύματα, αν και είναι δυσάρεστα στην αίσθηση που προκαλούν, δεν επηρεάζουν την ικανότητα του ατόμου που κρατά ένα αντικείμενο να ελέγξει τους μύες του και να αφήσει το αντικείμενο. Ρεύματα έντασης 9-25mA μπορούν να είναι επώδυνα, και να προκαλέσουν δυσκολία ή αδυναμία στον έλεγχο αντικειμένου που κρατά το άτομο. Ρεύματα ακόμη μεγαλύτερης έντασης προκαλούν μυικές συσπάσεις, που με τη σειρά τους μπορούν να επιφέρουν δυσκολία στην αναπνοή. Αυτές όμως οι επιδράσεις δεν είναι μόνιμες και παύουν όταν διακοπεί η ροή του ρεύματος μέσα στο άτομο, εκτός εάν η σύσπαση είναι πολύ σοβαρή και η αναπνοή έχει διακοπεί για λεπτά της ώρας. Ρεύματα έντασης 60-100mA προκαλούν κοιλιακό ινιδισμό, καρδιακή ανακοπή, δυσκολία στην αναπνοή και μπορούν να επιφέρουν τραυματισμό ή θάνατο. Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης δίνεται σημασία στο κατώφλι κοιλιακού ινιδισμού, δηλαδή επιδιώκεται τα ρεύματα σφάλματος να είναι έντασης μικρότερης από 60 mA. Τα ρεύματα μικρότερης έντασης από 60 mA, διάρκειας 0.03-3.0sec, σχετίζονται με την ενέργεια που απορροφάται από το σώμα του ατόμου σύμφωνα με την εξίσωση [15]:

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s \quad (4.14)$$

,όπου I_B : η rms τιμή του ρεύματος που διαρρέει το σώμα, σε A

t_s : η διάρκεια έκθεσης στο ρεύμα, σε sec

S_B : η εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια που αντέχει ορισμένο ποσοστό του πληθυσμού.

3) Χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος (t_f) : Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος, όπως διαφαίνεται στην εξίσωση (4.14), συμπεραίνεται ότι επιδιώκεται όσο το δυνατόν ταχύτερη εκκαθάριση του σφάλματος, για τους παρακάτω λόγους:

- Η πιθανότητα έκθεσης σε ηλεκτρικό σοκ μειώνεται δραματικά εάν ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρός.
- Δοκιμές και η εμπειρία από το παρελθόν έχουν δείξει ότι η πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού ή θανάτου μειώνεται σημαντικά εάν η χρονική διάρκεια της ροής του ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα είναι σύντομη.

Συνεπώς, στον καθορισμό της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής για το ρεύμα που διαρρέει το σώμα λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος των συσκευών προστασίας ($t_s = t_f$).

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, ο σχεδιασμός συστήματος γείωσης πρέπει να εξασφαλίζει ότι η διάρκεια και η ένταση του ρεύματος, συχνότητας 50Hz ή 60Hz , που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα δεν θα υπερβαίνει το κατώφλι πέρα από το οποίο προκαλείται κοιλιακός ινιδισμός. Από τη σχέση (4.14) είναι εμφανής η σχέση του χρονικού διαστήματος που είναι ανεκτή η ροή του ρεύματος στο σώμα και της έντασης του ρεύματος, θεωρώντας πάντα συχνότητα 50Hz ή 60Hz. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.14) προκύπτει [15] :

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (4.15)$$

,όπου

$$k = \sqrt{S_B} \quad (4.16)$$

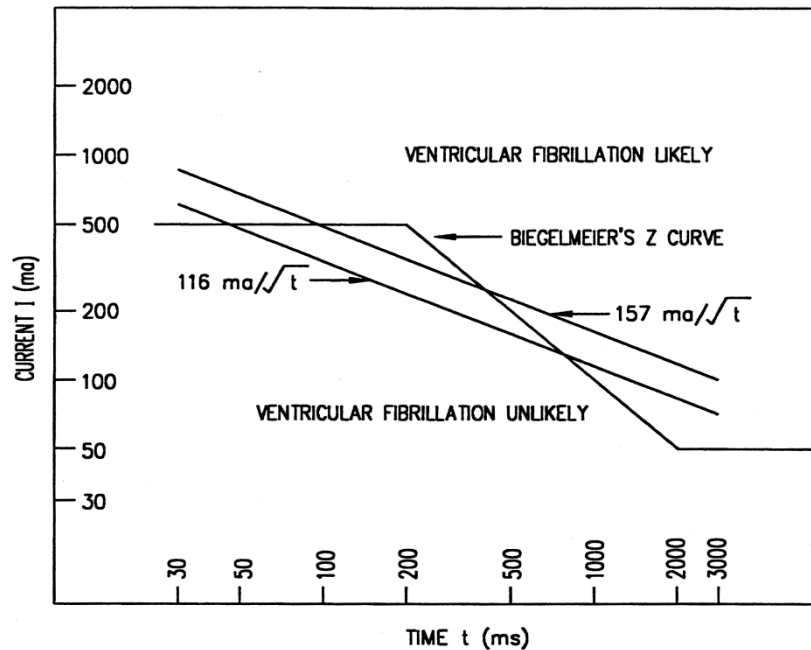
Πειράματα απέδειξαν ότι το 99.5% των ατόμων που ζυγίζουν περίπου 50kg έχουν ως ανώτατο όριο απορροφούμενης ενέργειας $S_B = 0.0135$. Τότε $k = 0.116$ και η σχέση για τον υπολογισμό του ανώτατου ορίου για την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σώμα γίνεται [15] :

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.17)$$

Αντίστοιχα πειράματα για άτομα σωματικού βάρους 70kg αντιστοιχούν σε ανώτατο όριο απορροφούμενης ισχύος $S_B = 0.0246$ και $k = 0.157$, οπότε [15] :

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.18)$$

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδίδονται και γραφικά στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 : Ρεύμα που ρέει στο ανθρώπινο σώμα, συναρτήσει του χρόνου [15]

4.3.2 Αντίσταση ανθρώπινου σώματος

Για ρεύμα συνεχές ή εναλασσόμενο βιομηχανικής συχνότητας το ανθρώπινο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο μιας ωμικής αντίστασης. Η τιμή R_B αυτής, συμπεριλαμβανομένου του δέρματος υπολογίζεται από 500Ω έως 3000Ω , ενώ μειώνεται σε περίπτωση εκδοράς του δέρματος στο σημείο επαφής. Η τιμή της μάλιστα διαφοροποιείται ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα μέσω του σώματος. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο δρόμοι για το ρεύμα, είτε από χέρι σε πόδι είτε από το ένα πόδι στο άλλο. Στη δεύτερη περίπτωση η αντίσταση εκτιμάται σημαντικά μεγαλύτερη της πρώτης, έως και 25 φορές. Θεωρώντας μηδενικές τις αντιστάσεις επαφής του χεριού και του ποδιού καθώς επίσης και τις αντιστάσεις για γάντια και για παπούτσια, είθισται να λαβάνεται ως τιμή για την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος από χέρι σε πόδι ή από χέρι σε χέρι τα 1000Ω [15]:

$$R_B = 1000 \Omega \quad (4.19)$$

Για ροή ρεύματος από το ένα πόδι στο άλλο, παρόλο που η αντίσταση θεωρείται υψηλότερη κι επομένως η ένταση του ρεύματος και συγχρόνως ο κίνδυνος θανάτου μειώνεται, υπάρχει μια περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης. Τάση μεταξύ των ποδιών επιφέρει πόνο και μπορεί να προκαλέσει πτώση του ατόμου, που έρχεται σε επαφή, στο έδαφος. Άμεσα ο κίνδυνος αυξάνεται καθώς προκαλείται ροή ρεύματος στην περιοχή των ζωτικών οργάνων. Καθώς έχουν καταγραφεί θάνατοι αυτής της αιτίας, θεωρείται απαραίτητος ο έλεγχος και της τάσης μεταξύ των ποδιών (βηματική τάση) εκτός της τάσης μεταξύ ποδιού και χεριού σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο (τάση επαφής).

Η αντίσταση R_f του ποδιού σε σχέση με τη γη προκύπτει από την προσέγγιση αυτού με έναν αγωγίμο μεταλλικό δίσκο, ακτίνας b σε m, που εφάπτεται σε επιφάνεια ομοιογενούς εδάφους, ειδικής αντίστασης ρ σε Ωm . Αμελώντας τις αντιστάσεις των υποδημάτων η αντίσταση R_f δίνεται από τον τύπο :

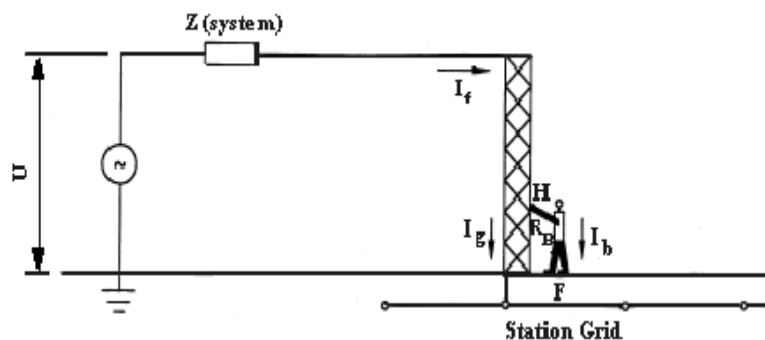
$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (4.20)$$

Συνήθως η ακτίνα του μεταλλικού δίσκου λαμβάνεται ίση με 0.08m κι έτσι καταλήγουμε στη σχέση :

$$R_f = 3.125 \rho \quad (4.21)$$

4.3.3 Ισοδύναμο κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος

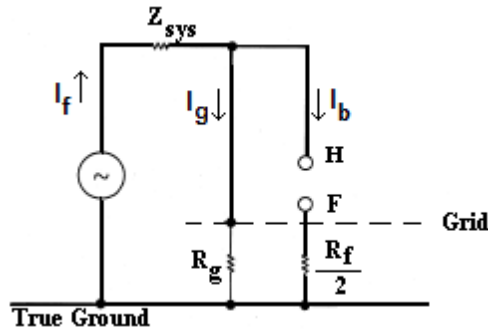
Η τάση επαφής αναπτύσσεται μεταξύ χεριού που έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο και ποδιού στη γη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Έκθεση ανθρώπου σε τάση επαφής [15]

Η συνολική εγκατάσταση ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z και το ρεύμα σφάλματος I_f διαχωρίζεται στο ρεύμα που ρέει προς τη γη I_g και το ρεύμα I_b που

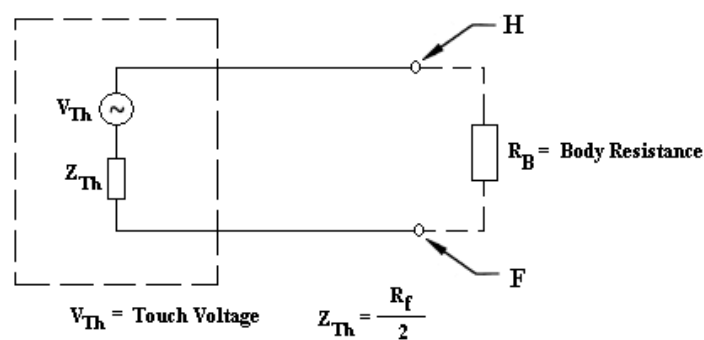
διαρρέει τον άνθρωπο αντίστασης R_B . Το άτομο αγγίζει το σύστημα στο σημείο H και ακουμπά στη γη στο σημείο F . Στο σχήμα 4.8 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα κατά την έκθεση ανθρώπου σε τάση επαφής. Η αντίσταση R_g είναι η αντίσταση γείωσης και η R_f είναι η αντίσταση του ποδιού ως προς τη γη.



Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα για τάση επαφής [15]

Σύμφωνα με το Θεώρημα Thevenin, η τάση Thevenin V_{th} είναι η τάση μεταξύ των σημείων H και F όπου το άτομο εφάπτεται (Σχήμα 4.9). Η αντίσταση Thevenin Z_{th} είναι η αντίσταση του συστήματος όπως φαίνεται από τα σημεία H και F με βραχυκυκλωμένες τις πηγές τάσης. Το ρεύμα I_b που διαρρέει το άτομο σε επαφή δίνεται από τη σχέση :

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_b} \quad (4.22)$$



Σχήμα 4.9 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για τάση επαφής [15]

Η παραλληλία των αντιστάσεων των ποδιών οδηγεί στην εξής έκφραση για την αντίσταση Thevenin:

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \quad (4.23)$$

,όπου R_f είναι η αντίσταση του ενός ποδιού, ως προς το έδαφος, αγνοώντας το σύστημα γείωσης, σε Ω .

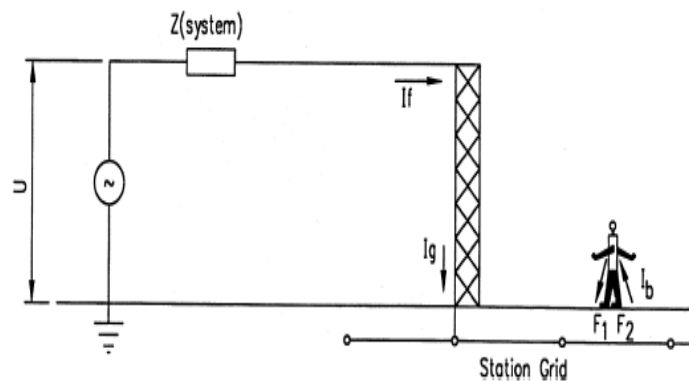
Με αντικατάσταση της σχέσης (4.21) στην (4.23) έχουμε τελικά :

$$Z_{Th} = 1.5 \rho \quad (4.24)$$

Για ρεύμα I_b ίσο με το ανεκτό I_B καταλήγουμε στη σχέση για το επιτρεπόμενο όριο τάσης επαφής :

$$E_{touch} = I_B \cdot (R_B + 1.5 \rho) \quad (4.25)$$

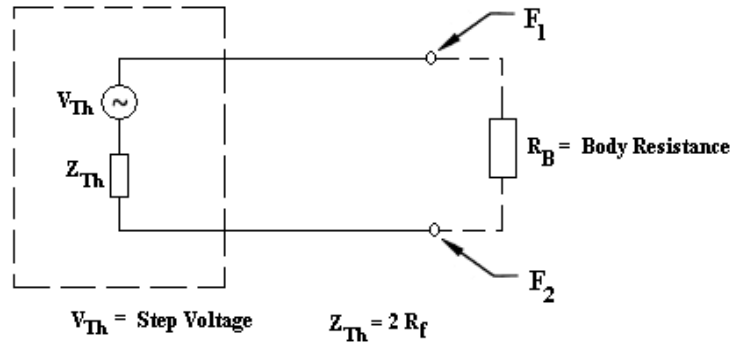
Η βηματική τάση αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ποδιών ανθρώπου, που στέκεται στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10 Έκθεση ανθρώπου σε βηματική τάση [15]

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα η συνολική εγκατάσταση ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z ενώ το ρεύμα σφάλματος I_f ισούται με το ρεύμα που ρέει προς τη γη I_g . Το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο ακολουθεί μέσα στο σώμα του τη διαδρομή από το ένα πόδι F_1 ως το άλλο πόδι F_2 . Τα σημεία F_1 και F_2 είναι τα σημεία της επιφάνειας της γης που είναι σε επαφή με τα πόδια του ανθρώπου.

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, για την αναπάρσταση ενός ανθρώπου υπό βηματική τάση, δίνεται στο σχήμα 4.11. Όμοια με πριν, η τάση V_{Th} είναι η τάση στα άκρα που ακουμπά ο άνθρωπος, F_1 και F_2 , όταν αυτά είναι ανοικτοκυκλωμένα ενώ η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin Z_{Th} είναι η αντίσταση του συστήματος, όπως αυτή φαίνεται από τα σημεία $F1$ και $F2$ με βραχυκυκλωμένες όλες τις πηγές τάσης.



Σχήμα 4.11 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για βηματική τάση [15]

Το ρεύμα I_b που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα δίνεται και σε αυτή την περίπτωση από την σχέση :

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_b} \quad (4.26)$$

Η αντίσταση Thevenin υπολογίζεται ίση με:

$$Z_{Th} = 2 \cdot R_f \quad (4.27)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (4.21) στην (4.27) έχουμε τελικά :

$$Z_{Th} = 6 \rho \quad (4.28)$$

Για ρεύμα I_b ίσο με το ανεκτό I_B καταλήγουμε στη σχέση για το επιτρεπόμενο όριο βηματικής τάσης :

$$E_{step} = I_B \cdot (R_B + 6 \rho) \quad (4.29)$$

4.3.4 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφάνειας

Η σχέση (4.21) που δίνει την αντίσταση R_f του ποδιού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης ρ του εδάφους βασίζεται στην υπόθεση ομοιογενούς εδάφους. Πολλές φορές όμως στην επιφάνεια του εδάφους τοποθετείται το λεγόμενο “υλικό επιφάνειας” σε στρώμα πάχους 0.08–0.15m με σκοπό την αύξηση της αντίστασης επαφής. Έτσι, σε περίπτωση που το έδαφος κάτω από το υλικό επιφάνειας έχει μικρότερη ειδική αντίσταση από αυτό, μόνο ένα μικρό μέρος του ρεύματος σφάλματος θα κινηθεί προς τα επάνω και το ρεύμα I_b θα μειωθεί. Η μείωση αυτή εξαρτάται τόσο από τη διαφορά των ειδικών αντιστάσεων του υλικού επιφάνειας και του υποκείμενου στρώματος εδάφους όσο και από το πάχος του υλικού επιφάνειας. Η επίδραση των δύο αυτών παραγόντων εκφράζεται από ένα συντελεστή, C_s , ο εμπειρικός τύπος του οποίου ακολουθεί :

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (4.30)$$

,όπου ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$

ρ_s : η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας σε $\Omega \cdot m$

h_s : το πάχος του υλικού επιφάνειας σε m

4.3.5 Κριτήρια για την βηματική τάση και την τάση επαφής

Η ασφάλεια ενός ατόμου έγκειται στην αποφυγή απορρόφησης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας μεγαλύτερης από ένα συγκεκριμένο όριο S_B , όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Για τη βηματική τάση το ανεκτό όριο είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.29) :

$$E_{step} = I_B \cdot (R_B + 2 \cdot R_f)$$

Για σωματικό βάρος 50 kg :

$$E_{step 50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.31)$$

ενώ για σωματικό βάρος 70 kg :

$$E_{step 70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.32)$$

Σύμφωνα με την σχέση (4.25) το ανεκτό όριο για την τάση επαφής είναι :

$$E_{touch} = I_B \cdot (R_B + \frac{R_f}{2})$$

Για σωματικό βάρος 50 kg :

$$E_{touch 50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.33)$$

ενώ για σωματικό βάρος 70 kg :

$$E_{touch 70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.34)$$

,όπου C_s : ο συντελεστής υλικού επιφανείας

E_{step} : η βηματική τάση σε V

E_{touch} : η τάση επαφής σε V

ρ_s : η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας σε Ωm

t_s : η διάρκεια έκθεσης στο σφάλμα σε sec

Εάν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφανείας τότε οι παραπάνω σχέσεις εξακολουθούν να ισχύουν με $C_s = 1$ και $\rho_s = \rho$.

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις $\rho_s = 0$ προκύπτουν οι εκφράσεις του ορίου ασφαλείας για την μέταλλο – μέταλλο τάση επαφής :

Για σωματικό βάρος 50 kg :

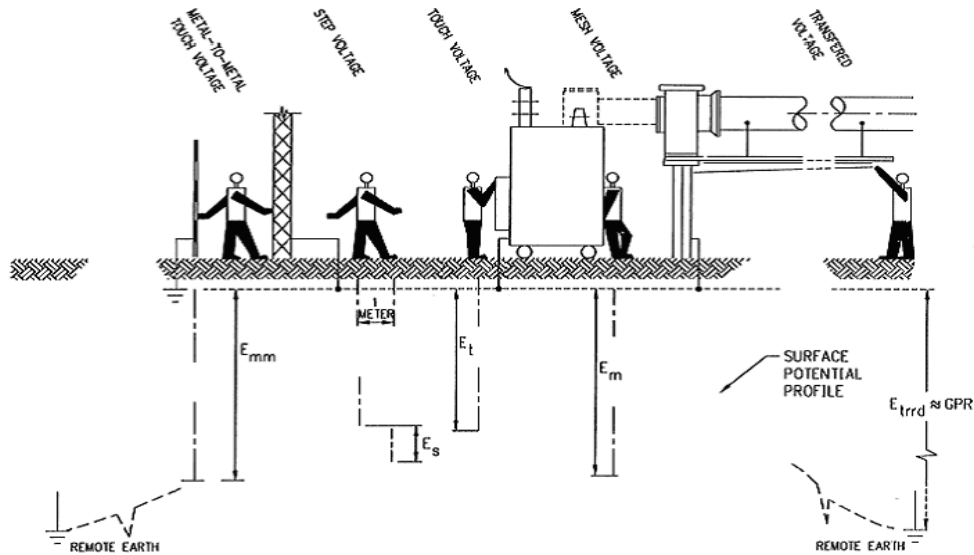
$$E_{mm-touch 50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.35)$$

ενώ για σωματικό βάρος 70 kg :

$$E_{mm-touch 70} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.36)$$

,όπου E_{mm} η μέταλλο – μέταλλο τάση επαφής σε V

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις αναπτυσσόμενων τάσεων που εμπλέκουν τον άνθρωπο με γειωμένα αντικείμενα, στον ευρύτερο χώρο ενός υποσταθμού (βηματική, επαφής, βρόχου, μέταλλο με μέταλλο, μεταφερόμενη). Βέβαια στην τοποθεσία εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας ενδιαφέρει κυρίως η βηματική τάση και η τάση επαφής, ως πιο πιθανές να αναπτυχθούν λόγω της ιδιαίτερης χωροταξίας του αντίστοιχου υποσταθμού (μετασηματιστής εντός ή κοντά στον μεταλλικό πυλώνα της Α/Γ).



Σχήμα 4.12 Τάσεις επαφής,βηματική,βρόχου,επαφής μεταξύ μετάλλων και από μεταφορά [15]

4.4 Βασικές παράμετροι σχεδίασης συστήματος γείωσης

4.4.1 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος (I_G)

Για τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος πλέγματος ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

α) Εντοπίζουμε το είδος και το σημείο εκδήλωσης των σφαλμάτων προς γη που προκαλούν τη μεγαλύτερη ροή ρεύματος μεταξύ του συστήματος γείωσης και του περιβάλλοντος εδάφους κι επομένως τη μεγαλύτερη τιμή του GPR και της κλίσης του δυναμικού στην επιφάνεια της γης, (βλ. 4.4.2).

β) Υπολογίζουμε το συντελεστή καταμερισμού S_f για το σφάλμα του Βήματος 1 και στην συνέχεια προσδιορίζουμε το ρεύμα I_g , (βλ. 4.4.3).

γ) Υπολογίζουμε για κάθε σφάλμα το συντελεστή εξασθένησης D_f βάσει του χρόνου εκαθάρσισης σφάλματος t_f , (βλ. 4.4.4).

δ) Επιλέγουμε το μεγαλύτερο από τα γινόμενα $D_f \times I_g$ ($= I_G$), που αντιπροσωπεύει τη χειρότερη περίπτωση.

4.4.2 Προσδιορισμός χειρότερου τύπου σφάλματος

Υπάρχουν πολλοί τύποι σφαλμάτων που μπορεί να συμβούν σε έναν υποσταθμό ωστόσο ταυτόχρονα σφάλματα δεν εξετάζονται, αν η πιθανότητα εκδήλωσης τους είναι αμελητέα, παρόλο που προκαλούν την εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων. Για πρακτικούς λοιπόν λόγους, εξετάζονται το μονοφασικό σφάλμα προς γη και το διφασικό σφάλμα προς γη, τα οποία ενεργοποιούν το σύστημα γείωσης μέσω του ομοπολικού ρεύματος, I_o .

Η ενεργός τιμή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας, I_o , για μονοφασικό σφάλμα προς γη υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο :

$$I_o = \frac{E \cdot (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) \cdot [R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) \cdot (R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad (4.37)$$

ενώ για διφασικό σφάλμα προς γη από την σχέση :

$$I_o = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (4.38)$$

όπου E : η φασική τάση στην θέση σφάλματος πριν το σφάλμα σε V

R_f : η αντίσταση σφάλματος σε Ω (συνήθως λαμβάνεται ίση με μηδέν)

R_1 : η αντίσταση θετικής ακολουθίας σε Ω

R_2 : η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας σε Ω

R_0 : η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας σε Ω

X_1 : η αντίδραση θετικής ακολουθίας σε Ω

X_2 : η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας σε Ω

X_0 : η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας σε Ω

Ο χειρότερος τύπος σφάλματος, από την πλευρά του συστήματος γείωσης, είναι αυτός που οδηγεί στην υψηλότερη τιμή του μέγιστου ρεύματος πλέγματος (I_G). Το μέγιστο ρεύμα πλέγματος I_G είναι ανάλογο του ρεύματος σφάλματος I_f και του συντελεστή καταμερισμού S_f , και θεωρώντας ότι ο συντελεστής S_f είναι ανεξάρτητος του τύπου σφάλματος, το χειρότερο σφάλμα προσδιορίζεται ως αυτό που οδηγεί στο μέγιστο ομοπολικό ρεύμα ή ρεύμα σφάλματος προς γη, $3I_o$. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, για δοσμένη θέση το μονοφασικό σφάλμα προς γη είναι ο χειρότερος τύπος σφάλματος, αν ισχύει $Z_1 Z_0 > Z_2^2$ στην θέση σφάλματος, ενώ αν ισχύει $Z_1 Z_0 < Z_2^2$, το διφασικό σφάλμα προς γη αποτελεί την χειρότερη περίπτωση σφάλματος. Στην σύνηθη περίπτωση όπου Z_1 θεωρείται ίσο με Z_2 οι παραπάνω σχέσεις εκφυλίζονται στις $Z_0 > Z_1$ και $Z_0 < Z_1$.

4.4.3 Προσδιορισμός συντελεστή καταμερισμού (S_f)

Ο συντελεστής καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος, S_f , δίνεται από τη σχέση:

$$S_f = \frac{I_g}{I_f} \quad (4.39)$$

,όπου I_g : η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος σε A

I_f : η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος γείωσης σε A

Ο συντελεστής καταμερισμού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Τοποθεσία εκδήλωσης του σφάλματος
- Πλάτος αντίστασης συστήματος γείωσης
- Θαμμένοι αγωγοί και σωλήνες στην περιοχή του συστήματος γείωσης
- Εναέριοι αγωγοί γείωσης και ουδετέρου

Για τον υπολογισμό του έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, λεπτομερής αναφορά γίνεται στο *Παράρτημα C* του προτύπου [15].

4.4.4 Προσδιορισμός συντελεστή εξασθένησης (D_f)

Το μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση :

$$i_f(t) = \sqrt{2}E \cdot Y_{ac} \left[\sin(\omega t + a - \theta) - e^{-t/T_a} \cdot \sin(a - \theta) \right] \quad (4.40)$$

,όπου $i_f(t)$: η στιγμιαία τιμή του μη συμμετρικού ρεύματος σφάλματος σε A

E : η rms τιμή της φασικής τάσης πριν το σφάλμα σε V

ω : η κυκλική συχνότητα σε rad/s

a : η γωνία της τάσης κατά την εκδήλωση του σφάλματος σε rad

θ : η φάση του ρεύματος σε rad

Y_{ac} : η ισοδύναμη ac αγωγιμότητα του συστήματος σε mhos

T_a : η σταθερά χρόνου του dc offset σε s [$T_a = X/(\omega R)$]

Για τον προσδιορισμό του λόγου X/R χρησιμοποιούνται το φανταστικό (X) και πραγματικό (R) μέρος της υπομεταβατικής εμπέδησης σφάλματος. Εξετάζουμε τη χειρότερη περίπτωση που αφορά τη μεγιστοποίηση του dc offset, δηλαδή την περίπτωση όπου $(a - \theta) = -\pi/2$, οπότε η σχέση γίνεται (4.40) παίρνει την εξής μορφή:

$$i_f(t) = \sqrt{2}E \cdot Y_{ac} \left[e^{-t/T_a} - \cos(\omega t) \right] \quad (4.41)$$

Ορίζουμε την ενεργό τιμή του μη συμμετρικού ρεύματος, I_F , ως εξής :

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (4.42)$$

,όπου t_f η διάρκεια του σφάλματος σε sec

Ορίζοντας $I_F = E \cdot Y_{ac}$, ο συντελεστής εξασθένησης D_f δίνεται από τη σχέση :

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (4.43)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (4.42) στην (4.43) καταλήγουμε στον ακόλουθο τύπο για τον συντελεστή εξασθένησης :

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad (4.44)$$

Για μεγάλη διάρκεια σφάλματος (> 30 κύκλους) ο συντελεστής εξασθένησης θεωρείται ίσος με την μονάδα.

4.4.5 Διαδικασία Σχεδίασης Συστήματος Γείωσης

Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Βέβαια η ροή του ρεύματος προς το σημείο αυτό πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας τόσο την αξιοπιστία του συστήματος όσο και την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα σφαλμάτων προς τη γη, μειώνοντας παράλληλα τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς [21]. Για να είναι ένα σύστημα γείωσης ασφαλές, πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του σε περίπτωση εμφάνισης οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από ηλεκτροπληξία άτομα που, είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού, όπως η βηματική τάση και η τάση επαφής που αναπτύσσονται, κάτω από συγκεκριμένα όρια. Επομένως, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα :

1. Προστασία του ανθρώπου από τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που ενδεχομένως αναπτύσσονται.
2. Προστασία τόσο της κατασκευής όσο και του εξοπλισμού από ρεύματα σφαλμάτων.
3. Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 τα βασικά στάδια κατά την σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης, συνοψίζονται παρακάτω :

Βήμα 1^ο : Προσδιορισμός του χειρότερου τύπου και θέσης σφάλματος του υποσταθμού, που δίνει το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος προς γη ($3I_0$), για την θερμική και μηχανική διαστασιολόγηση των αγωγών του πλέγματος.

Βήμα 2^ο : Συλλογή πληροφοριών για την περιοχή όπου θα γίνει η εγκατάσταση σε συνδυασμό με μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους και κατάλληλη επιλογή του μοντέλου εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό (ομοιογενές, διστρωματικό, πολυστρωματικό κλπ).

Βήμα 3^ο : Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης με βάση το μοντέλο που έχει επιλεγθεί για την προσέγγιση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου εδάφους.

Βήμα 4^ο : Προσδιορισμός του μέγιστου ρεύματος πλέγματος I_G , βάσει του μέγιστου αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος $3I_0$, του συντελεστή καταμερισμού ρεύματος σφάλματος S_f καθώς και του συντελεστή εξασθένησης D_f .

Βήμα 5^ο : Υπολογισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών βηματικής τάσης και τάσης επαφής (όρια ασφαλείας)

Βήμα 6^ο : Υπολογισμός της ανύψωσης του δυναμικού γης (GPR) και έλεγχος τήρησης του ορίου για την τάση επαφής. Αν η τιμή του GPR είναι μικρότερη από επιτρεπτό όριο για την τάση επαφής ($I_G R_G < E_{\text{touch}}$), δεν είναι απαραίτητη περαιτέρω ανάλυση.

Βήμα 7^ο : Υπολογισμός της τάσης βρόχου και της βηματικής τάσης στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης. Αν οι τιμές των τάσεων αυτών είναι εντός των επιτρεπτών ορίων η σχεδίαση προχωρά στο βήμα 7, αλλιώς στο βήμα 8.

Βήμα 8^ο : Αν οι αναπτυσσόμενες τάσεις (επαφής και βηματικές) είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, η ολοκλήρωση της σχεδίασης απαιτεί μόνο την προσθήκη συνδέσεων των συσκευών του υποσταθμού στο σύστημα γείωσης.

Βήμα 9^ο : Αν οι αναπτυσσόμενες τάσεις (επαφής και βηματικές) υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, απαιτείται αναθεώρηση της σχεδίασης, που μπορεί να περιλαμβάνει αύξηση της επιφάνειας που καταλαμβάνει το σύστημα γείωσης, πυκνώση του πλέγματος γείωσης, προσθήκη επιπρόσθετων ράβδων γείωσης κ.α

Στο κεφάλαιο 8 γίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται κατά την σχεδίαση του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου.

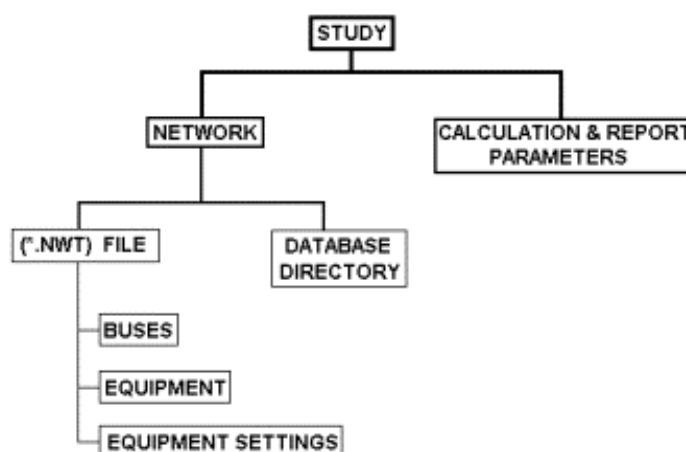
Κεφάλαιο 5

Περιγραφή του λογισμικού πακέτου PSAF

Η πολυπλοκότητα που συνεπάγεται η διαδικασία υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος με βάση διεθνή πρότυπα [5],[12] καθιστά απαραίτητη την χρήση ειδικού λογισμικού κατά την μελέτη βραχυκύκλωσης ενός ηλεκτρικού δικτύου. Το λογισμικό πακέτο Power System Analysis Framework (PSAF) της канаδέζικης εταιρίας CYME International αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο για την διεξαγωγή των πιο συνηθισμένων μελετών που απαιτούνται για την ασφαλή και απρόσκοπτη λειτουργία ενός ηλεκτρικού ή βιομηχανικού δικτύου (βραχυκύκλωσης, ροής φορτίου, εκκίνησης κινητήρων, επιλογικής προστασίας, ευστάθειας τάσης, αξιοπιστίας κ.α).

5.1 Αρχεία PSAF

Κάθε δίκτυο (network) αποτελείται από ένα αρχείο network (*.nwt), ένα αρχείο study (*.stu) και μια βάση δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτών αποτελεί ένα “ Project” στο οποίο ανήκει το υπό εξέταση δίκτυο, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.1 Λειτουργική διαμόρφωση ενός αρχείου PSAF

Η βάση δεδομένων διατηρεί τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού του δικτύου, όπως τα ονομαστικά μεγέθη που αναφέρονται στην ταμπέλα μιας μηχανής.

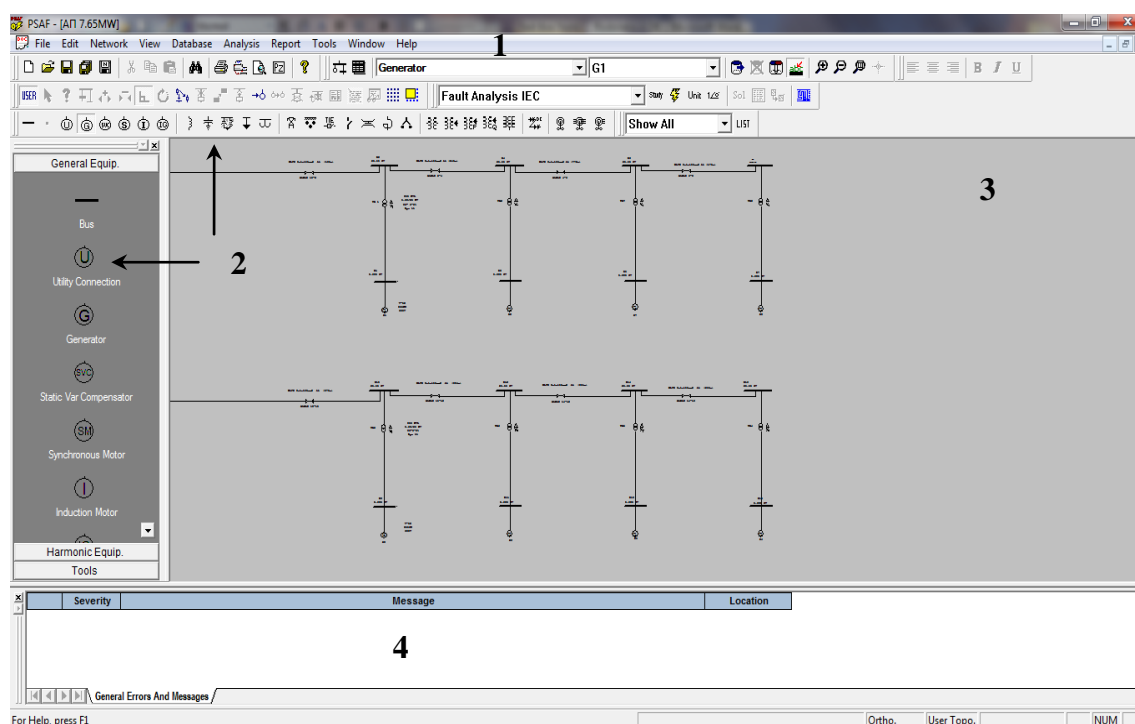
Το .nwt αρχείο αντλεί από την βάση δεδομένων τα απαραίτητα στοιχεία για τις καρτέλες του εξοπλισμού του δικτύου

Το .stu αρχείο περιέχει τις παραμέτρους που απαιτούνται από τις μηχανές επίλυσης (calculation engines) για τον υπολογισμό και έκθεση των αποτελεσμάτων.

5.2 Γραφικό περιβάλλον (PSAF GUI)

Το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος (PSAF GUI) αποτελείται από τέσσερις (4) βασικούς τομείς , όπως φαίνεται στην εικόνα

1. Βασικός Κατάλογος (Main Menu)
2. Γραμμές Εργαλείων (Toolbars)
3. Κύριο Παράθυρο (Main Display Screen)
4. Παράθυρο Μηνυμάτων (Message Window)



Εικόνα 5.2 Γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής του PSAF

Τα απαιτούμενα βήματα για την εκτέλεση μιας ανάλυσης, με χρήση των επιλυτών του PSAF, συνοψίζονται παρακάτω :

1. Περιγραφή Γενικού Εξοπλισμού στις Βάσεις Δεδομένων
2. Διασύνδεση Εξοπλισμού (One Line Diagram)
3. Ενημέρωση των καρτελών των επιμέρους στοιχείων (equipment dialog boxes)
4. Επιλογή της επιθυμητής ανάλυσης προς εκτέλεση (calculation engine)
5. Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων προς παρουσίαση (calculation & reports parameters)
6. Εκτέλεση της ανάλυσης (solve)

5.3 Περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης σφάλματος

Για την προσομοίωση σφαλμάτων το λογισμικό παρέχει, μέσω της εφαρμογής CYMFAULT, τρεις (3) εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος βραχυκύκλωσης :

5.3.1 Ανάλυση Σφάλματος κατά IEC (CYMFAULT IEC)

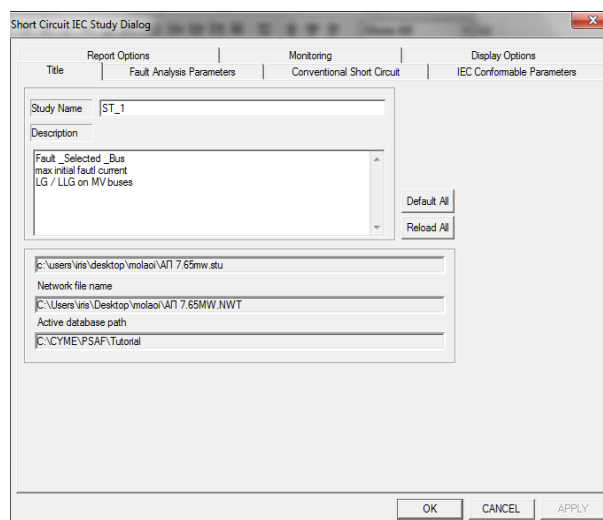
Ακολουθεί τα όσα προβλέπει το διεθνές πρότυπο IEC 60909 σχετικά με τον υπολογισμό ρεύματος σφάλματος σε 3-φασικά εναλασσόμενα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συχνότητας 50 ή 60 Hz :

- Υπολογίζει το αρχικό rms συμμετρικό ρεύμα (I_k''), το ρεύμα κορυφής (I_p) , το ρεύμα διακοπής (I_b) και το ρεύμα μόνιμης κατάστασης (I_k) σε κάθε είδους δίκτυα (ακτινικά και βροχοειδή)
- Υπολογίζει μέγιστη και ελάχιστη τιμή αναμενόμενου ρεύματος σφάλματος
- Δεν λαμβάνει υπόψιν τα προ σφάλματος ρεύματα φορτίου, αμελώντας τα μη στρεφόμενα φορτία (στατικά)
- Αμελεί την αντίσταση σφάλματος προσομοιώνοντας “νεκρό” βραχυκύκλωμα

Για την προσομοίωση σφάλματος με χρήση του επιλυτή Cymfault IEC ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Επιλέγεται η μηχανή επίλυσης **Fault Analysis IEC** από την γραμμή εργαλείων Study toolbar ή μέσω των εντολών μενού **Solve > Select a Solver**
2. Επιλογή του εικονιδίου **Study** ή εναλλακτικά επιλέγοντας **Solve > Study**

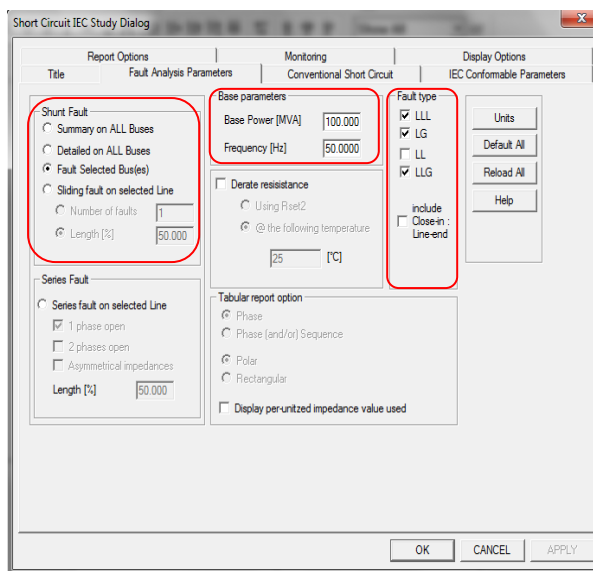
Στην συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της εικόνας 6.3 στο οποίο φαίνεται το ενεργό study, το αρχείο δικτύου που αναλύεται καθώς και η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 5.3 Παράθυρο Διαλόγου IEC Study

3. Επιλέγεται η καρτέλα **Fault Analysis Parameters**, όπου καθορίζονται :

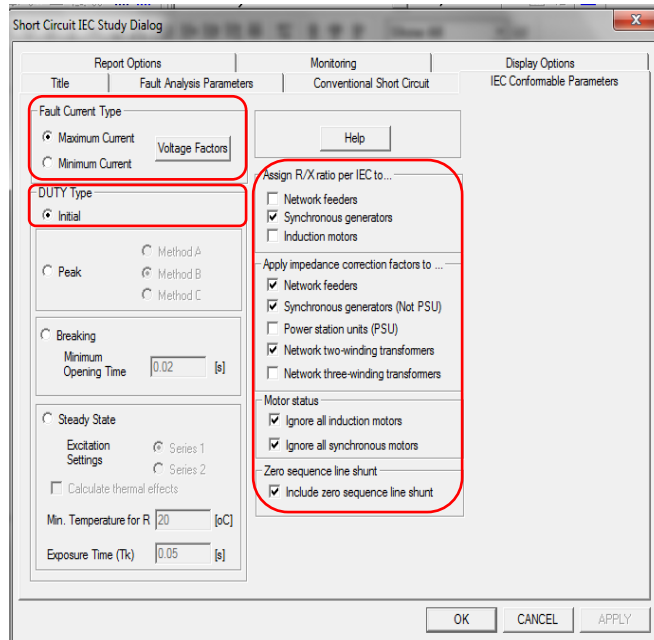
- Η βασική ισχύς του συστήματος (S_B) και η ονομαστική συχνότητα αυτού (f)
- Ο τύπος των σφαλμάτων (βραχυκύκλωμα/ανοιχτοκύκλωμα) και το είδος αυτών (LLL, LG, LLG, LL)
- Ο τρόπος έκθεσης των επιθυμητών αποτελεσμάτων (Summary/Detailed/Fault Selected/Sliding Fault)



Εικόνα 5.4 Καρτέλα καθορισμού παραμέτρων ανάλυσης σφάλματος (Fault Analysis Parameters)


4. Επιλογή καρτέλας **IEC Conformable Parameters**, όπου καθορίζεται :

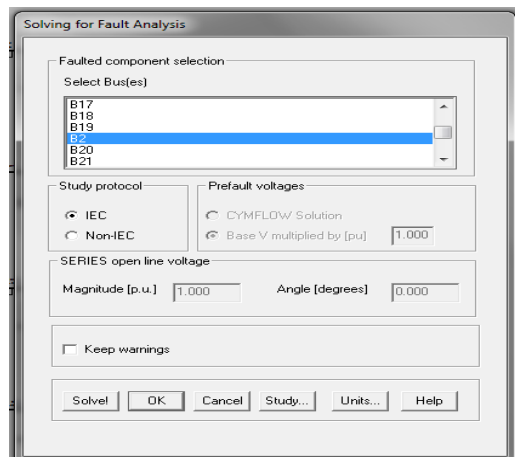
- Τύπος (duty type) και είδος (μέγιστο, ελάχιστο) επιθυμητού ρεύματος σφάλματος
- Συντελεστές διόρθωσης σύνθετων αντιστάσεων των ηλεκτρικών στοιχείων του δικτύου (βλ. πίνακα 2.2)



Εικόνα 5.5 Καρτέλα προσδιορισμού παραμέτρων ανάλυσης σφάλματος κατά IEC (IEC Conformable Parameters)

Σε αυτό το βήμα επιλέγεται προς προσδιορισμό το μέγιστο αρχικό rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος $I_{k \max}''$.

5. Επιλογή εικονιδίου επίλυσης  στην γραμμή εργαλείων ή ισοδύναμα επιλογή **Analysis > Solve**.



Εικόνα 5.6 Παράθυρο Διαλόγου Επίλυσης

Εδώ επιλέγεται ο υποψήφιος ζυγός σφάλματος, το πρότυπο που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρεύματος (IEC, Conventional Fault Analysis) καθώς και οι προ του σφάλματος τάσεις ζυγών.

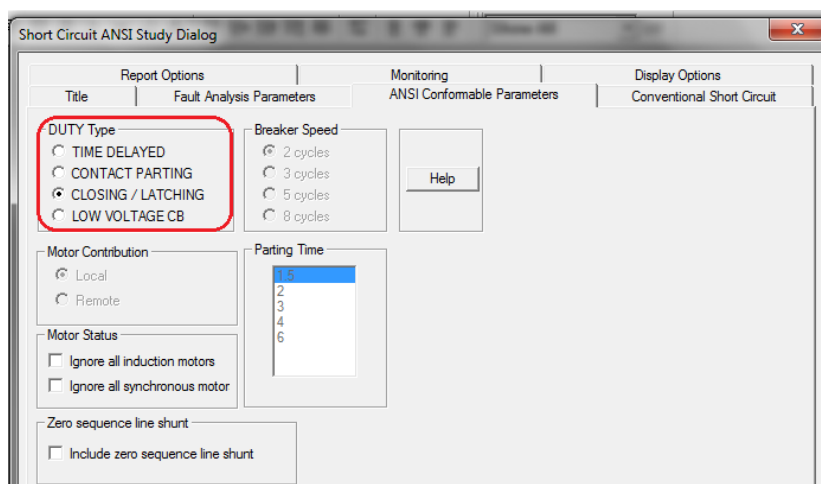
5.3.2 Ανάλυση Σφάλματος κατά ANSI (CYMFAULT ANSI)

Ακολουθεί τα όσα προβλέπει το αμερικάνικο Πρότυπο ANSI για εφαρμογές διαστασιολόγησης και επιλογής των μέσων προστασίας, C37.010 (symmetrical current basis), C37.5 (total current basis) και C37.13 (low voltage circuit breakers):

- Υπολογίζει τέσσερις (4) τύπους ρεύματος εφαρμόζοντας κατάλληλους διορθωτικούς συντελεστές για να λάβει υπόψιν την επίδραση της dc συνιστώσας (ασυμμετρία)
- Ρυθμίζει τις αντιδράσεις των στρεφόμενων μηχανών (γεννητριών/κινητήρων) για να λάβει υπόψιν την φθίνουσα ac συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος
- Αμελεί τα προ του σφάλματος φορτία επειδή τα ρεύματα φορτίου είναι πολύ μικρότερα από τα ρεύματα σφάλματος
- Αμελεί την αντίσταση σφάλματος (Z_f), θεωρώντας μόνο “νεκρό” βραχυκύκλωμα


Για την προσομοίωση σφάλματος με χρήση του επιλυτή Cymfault IEC, ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Επιλέγεται η μηχανή επίλυσης **Fault Analysis ANSI** από την γραμμή εργαλείων Study toolbar ή μέσω των εντολών μενού **Solve > Select a Solver**
2. Επιλέγεται το εικονίδιο **Study** ή εναλλακτικά **Solve > Study**
3. Επιλέγεται η καρτέλα **Fault Analysis Parameters**, όπου καθορίζεται ο τύπος /είδος των σφαλμάτων καθώς και ο τρόπος έκθεσης των επιθυμητών αποτελεσμάτων
4. Επιλογή καρτέλας ANSI Conformable Parameters, όπου καθορίζεται ο τύπος (duty type) του υπό προσδιορισμό ρεύματος σφάλματος



Εικόνα 5.7 Καρτέλα προσδιορισμού παραμέτρων ανάλυσης σφάλματος κατά ANSI (ANSI Conformable Parameters)

Σε αυτό το βήμα επιλέγεται το closing / latching duty type, ώστε να πάρουμε το rms συμμετρικό ρεύμα πρώτου κύκλου (first cycle current).

5. Επιλογή εικονιδίου επίλυσης  στην γραμμή εργαλείων ή ισοδύναμα επιλογή **Analysis > Solve**.

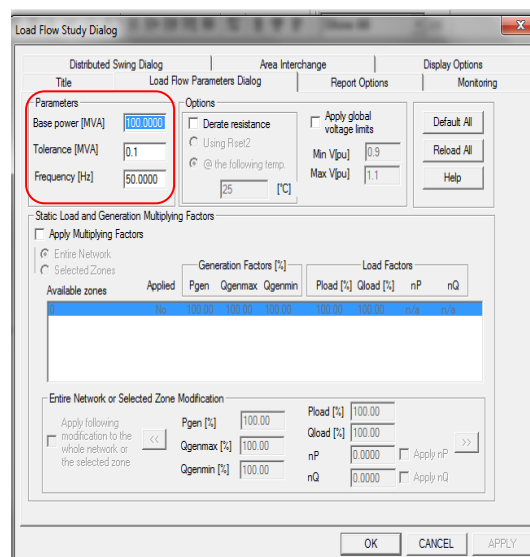
5.3.3 Συμβατική Ανάλυση Σφάλματος (Conventional Fault Analysis)

Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο για την ανάλυση σφάλματος. Βασίζεται στην αρχή της υπέρθεσης (superposition principle) σύμφωνα με την οποία, το προ σφάλματος ρεύμα φορτίου (I_b) αθροίζεται ανυσματικά με τα ρεύματα που συνεισφέρουν οι πηγές δίνοντας τελικά το ρεύμα σφάλματος (I_f).


- Υπολογίζει rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την φθίνουσα ac και dc συνιστώσα αυτού.
- Λαμβάνει αντίσταση σφάλματος (Z_f) υπολογίζοντας μη ιδανικό βραχυκύκλωμα.
- Προϋποθέτει Ανάλυση Ροής Φορτίου για τον υπολογισμό του προ σφάλματος ρεύματος φορτίου (I_b).
- Υπολογίζει ρεύματα και τάσεις για ασύμμετρα σφάλματα ανοικτού διακόπτη.

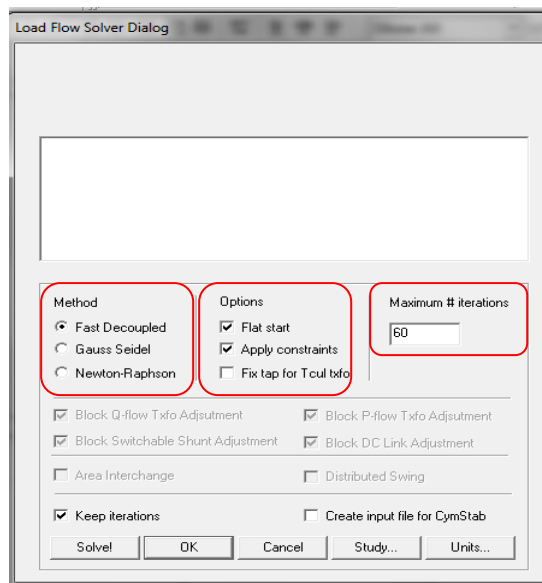
Για την προσομοίωση σφάλματος με χρήση του επιλυτή Conventional Fault Analysis (CFA) ακολουθείται η εξής διαδικασία :

1. Αρχικά επιλέγεται η μηχανή επίλυσης **Power Flow Analysis** από την γραμμή εργαλείων Study toolbar ή μέσω των εντολών μενού **Solve > Select a Solver**
2. Επιλέγεται το εικονίδιο **Study** ή εναλλακτικά **Solve > Study**
3. Επιλέγεται η καρτέλα Load Flow Parameters όπου καθορίζεται η βασική ισχύς (S_B), η συχνότητα (f) του συστήματος και η ακρίβεια σύγκλισης (ανοχή) της επιλεχθείσας μεθόδου ροής φορτίου.



Εικόνα 5.8 Καρτέλα καθορισμού παραμέτρων ανάλυσης ροής φορτίου (Load Flow Analysis Parameters)

4. Επιλογή εικονιδίου επίλυσης  στην γραμμή εργαλείων ή ισοδύναμα επιλογή *Analysis > Solve*.

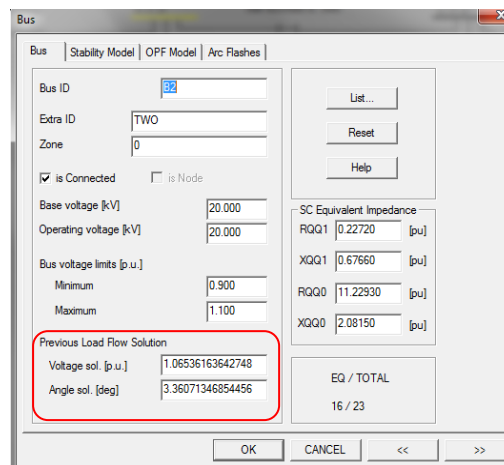


Εικόνα 5.9 Παράθυρο Διαλόγου Επίλυσης

Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέχθηκε :

- Ο αλγόριθμος ανάλυσης ροής φορτίου Fast Decoupled
- Αρχικοποίηση της τάσης των ζυγών στο $1pu \angle 0^\circ$
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ίσος με 60

Μετά την εκτέλεση της ροής φορτίου οι προ του σφάλματος λειτουργικές τάσεις των ζυγών διατηρούνται ώστε να χρησιμοποιηθούν στην συμβατική μέθοδο ανάλυσης σφαλμάτων, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

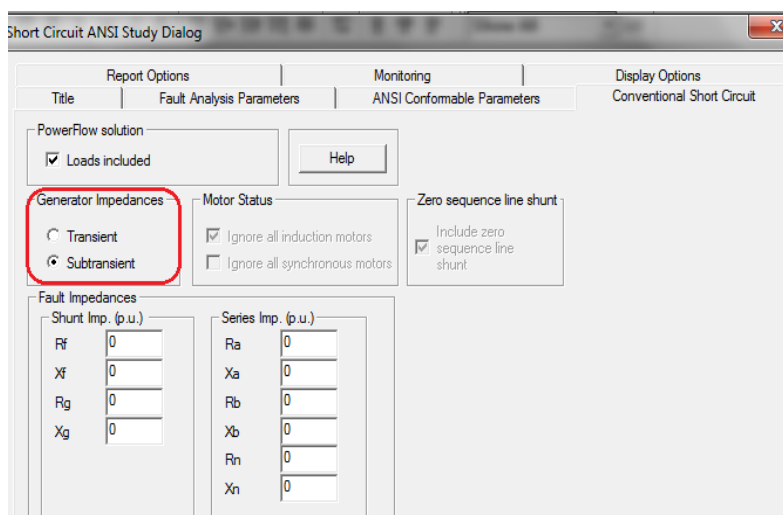


Εικόνα 5.10 Παράθυρο διαλόγου για ζυγό δικτύου

5. Επιλέγεται η μηχανή επίλυσης **Fault Analysis ANSI** από την γραμμή εργαλείων Study toolbar ή μέσω των εντολών μενού **Solve > Select a Solver**


6. Επιλέγεται το εικονίδιο **Study** ή εναλλακτικά **Solve > Study**

7. Επιλέγεται η καρτέλα Conventional Short Circuit, όπου καθορίζεται η τιμή της αντίδρασης των γεννητριών (Transient / Subtransient), οι προ του σφάλματος τάσεις ζυγών (Power Flow Solution) και η αντίσταση σφάλματος.



Εικόνα 5.11 Καρτέλα προσδιορισμού παραμέτρων ανάλυσης σφάλματος κατά CFA (Conventional Short Circuit)

Σε αυτό το βήμα επιλέχθηκε η υπομεταβατική αντίδραση των γεννητριών (X_d'') και μηδενική αντίσταση σφάλματος (“νεκρό” βραχυκύκλωμα), ώστε να υπάρχει αντιστοιχία με τις παραμέτρους ανάλυσης σφάλματος των μεθόδων IEC και ANSI, παίρνοντας το υπομεταβατικό rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (subtransient).

8. Επιλογή εικονιδίου επίλυσης  στην γραμμή εργαλείων ή ισοδύναμα επιλογή **Analysis > Solve**.

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται μια συγκριτική αντιπαράθεση μεταξύ των τριών μεθόδων ανάλυσης σφάλματος (IEC, ANSI, CFA) ως προς τις βασικές παραδοχές θεώρησης και υπολογισμού αυτών.

	IEC	ANSI	CFA
Ρύθμιση σύνθετης αντίστασης κινητήρων	OXI	NAI	OXI
Ανάλυση ροής φορτίου	OXI	NAI	NAI
Προ σφάλματος ρεύμα φορτίου	OXI	OXI	NAI
Αντίσταση σφάλματος (\tilde{Z}_f)	OXI	OXI	NAI
Βραχυκύκλωμα (3Φ, 1Φ, 2Φ, 2Φ-γη)	NAI	NAI	NAI
Ανοιχτοκύκλωμα	NAI	OXI	NAI
Συμετρικό rms ρεύμα	NAI	NAI	NAI
Ασύμμετρο rms ρεύμα	NAI	NAI	OXI

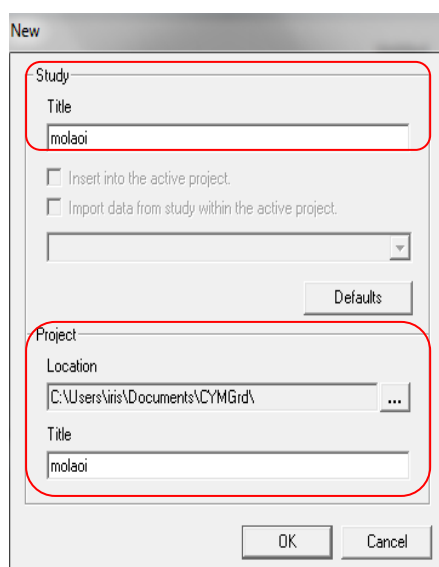
Κεφάλαιο 6

Περιγραφή του λογισμικού πακέτου CYMGrd

Το λογισμικό πακέτο Cyme Grounding (CYMGRD) της канаδέζικης εταιρίας CYME International αποτελεί ένα εξειδικευμένο υπολογιστικό εργαλείο για την σχεδίαση συστημάτων γείωσης υποσταθμών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, πλήρως εναρμονισμένο με την θεωρία και τις εφαρμογές του διεθνούς Προτύπου ANSI/IEEE Std 80 – 2000.

6.1 Γενικά

Μετά την εκκίνηση της εφαρμογής (**Start > Programs > CYMGRD**) δημιουργούμε ένα νέο αρχείο ακολουθώντας την ροή εντολών **File > New**. Στην συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 6.1, όπου επιλέγουμε το όνομα του **'Project'** και του **'Study'** που αυτό περιλαμβάνει.



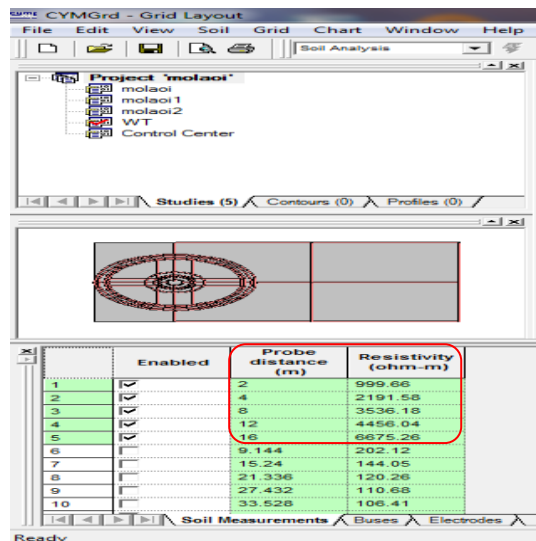
Εικόνα 6.1

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την προσομοίωση της απόκρισης ενός συστήματος γείωσης, υπό συνθήκες σφάλματος, διακρίνεται στα εξής τέσσερα (4) στάδια :

1. Ανάλυσης εδάφους (Soil analysis module)
2. Διαστασιολόγησης ηλεκτροδίων (Electrode sizing module)
3. Ανάλυσης πλέγματος γείωσης (Grid analysis module)
4. Εξαγωγής γραφημάτων (Plotting module)

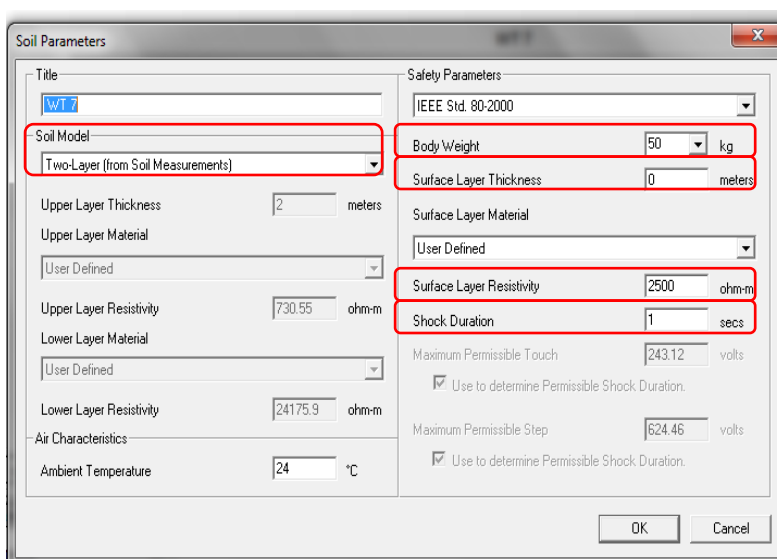
6.2 Ανάλυση Εδάφους (Soil Analysis Module)

Σε αυτό το στάδιο εισάγουμε τις μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους (βλ. εικόνα 6.2) και επιλέγουμε την επιθυμητή δομή προσέγγισης εδάφους.



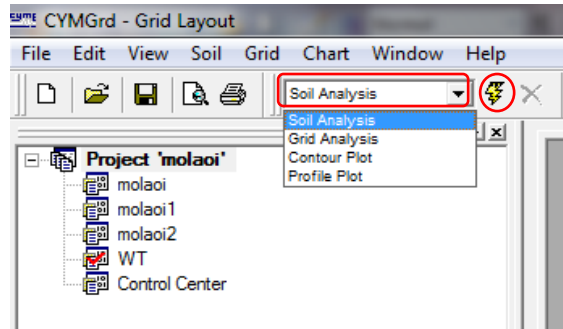
Εικόνα 6.2

Συγκεκριμένα, επιλέγοντας **Soil > Parameters** εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 6.3, όπου επιλέγεται το επιθυμητό μοντέλο εδάφους (μονοστρωματικό ή διστρωματικό) και οι παράμετροι ασφάλειας b , h_s , ρ_s , t_s για τον καθορισμό των ορίων ασφαλείας βηματικής και τάσης επαφής. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει την θερμοκρασία του αέρα (ambient temperature) για την διαστασιολόγηση των αγωγών του πλέγματος γείωσης, όπως θα δούμε παρακάτω.



Εικόνα 6.3

Αφού ορίσουμε τις παραμέτρους, όπως φαίνεται στην παραπάνω καρτέλα, επιλέγουμε την μηχανή επίλυσης **Soil Analysis** και στην συνέχεια το εικονίδιο επίλυσης **Solve** (βλ. εικόνα 6.4).

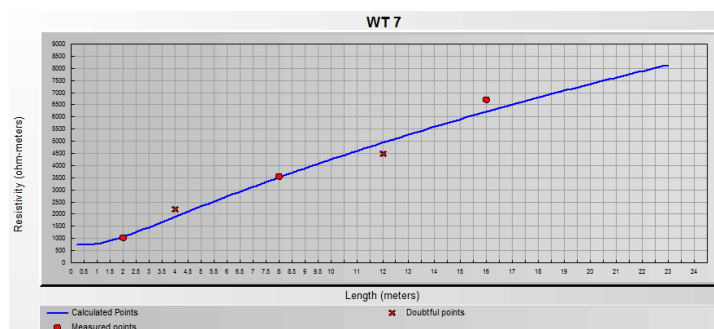


Εικόνα 6.4

Μετά την επίλυση του εδάφους τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην καρτέλα Reports. Επιλέγουμε **Soil Analysis Report** και εμφανίζεται η έκθεση αποτελεσμάτων της εικόνας 6.5, όπου φαίνεται το πάχος και η ειδική αντίσταση κάθε στρώματος τα όρια ασφαλείας καθώς και το RMS error λόγω της διστρωματικής προσέγγισης του εδάφους που επιλέχθηκε (βλ.εικόνα 6.6).

Soil analysis report	
Station Name	WT 7
Project	molaoi
Study	WT
Parameters	
Title	WT 7
Soil Model	Two-Layer
Safety Model	IEEE Std. 80-2000
Body Weight	50 kg
Surface Layer Thickness	0 meters
Surface Layer Resistivity	2500 ohm-m
Shock Duration	1 secs
Output Results	
Upper Layer Thickness	h_1 2 meters
Upper Layer Resistivity	ρ_1 730.55 ohm-m
Lower Layer Resistivity	ρ_2 24175.9 ohm-m
Reduction Factor Cs	1
Maximum Permissible Touch	243.12 volts E_{touch}
Maximum Permissible Step	624.46 volts E_{step}
RMS Error	9 %

Εικόνα 6.5



Εικόνα 6.6

6.3 Διαστασιολόγηση Ηλεκτροδίων (Electrode Sizing Module)

Αφού έχουν προσδιοριστεί οι ηλεκτρικές παράμετροι του εδάφους προχωρούμε στην διαστασιολόγηση των ηλεκτροδίων γείωσης. Αρχικά καθορίζουμε τις απαιτούμενες παραμέτρους σφάλματος επιλέγοντας την καρτέλα **Buses** (βλ.εικόνα 6.7), όπου εισάγουμε :

- το πλήθος των ζυγών του υποσταθμού : ο υποσταθμός της Α/Γ διαθέτει ζυγό ΜΤ (20 kV) και ζυγό ΧΤ (0,69 kV)
- το μονοφασικό ρεύμα σφάλματος προς γη (αποτελέσματα CYM Fault - PSAF)
- την διάρκεια σφάλματος t_f
- την ποσοστιαία συνεισφορά ρεύματος σφάλματος : για σφάλμα προς γη στην ΜΤ αμελείται η συνεισφορά από την πλευρά ΧΤ

Remote Contribution = 100% / 0% , για ΜΤ / ΧΤ αντίστοιχα

- τον λόγο X/R για μονοφασικό σφάλμα προς γη (αποτελέσματα CYM Fault - PSAF)

$$X/R_{LG} = \frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + R_0}$$

	Enabled	Bus ID	LG Fault Current (amps)	Fault Duration (secs)	Remote Contribution (%)	LG X/R
1	<input checked="" type="checkbox"/>	20 kV	833.3	1	100	0.3
2	<input checked="" type="checkbox"/>	0.69 kV	26625	1	0	9.06
3	<input type="checkbox"/>					

Εικόνα 6.7

Στην συνέχεια από την καρτέλα **Electrodes** επιλέγουμε το επιθυμητό υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης, συγκεκριμένα επιλέχθηκε χαλκός καθώς έχει υψηλή αγωγιμότητα και ιδιαίτερη αντοχή στην διάβρωση. Η ελάχιστη απαιτούμενη διαστασιολόγηση προκύπτει ίση με 4/0 AWG δηλαδή 150 mm², όπως φαίνεται στην εικόνα 6.8 .

Enabled	Type	Material	Conductivity	Alpha Factor	Pr	TCAP	Tm
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductor	Copper anne	100	0.00393	1.72	3.42	1083
<input type="checkbox"/>	Conductor	Copper com	97	0.00381	1.70	3.42	1084
<input type="checkbox"/>	Conductor	Copper clad	40	0.00378	4.4	3.85	1084
<input type="checkbox"/>	Conductor	Copper clad	30	0.00378	5.86	3.85	1084
<input type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
<input type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum 50	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
<input type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum 62	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
<input type="checkbox"/>	Conductor	Aluminum cl	20.3	0.0036	8.48	3.58	657
<input type="checkbox"/>	Rod	Copper clad	20	0.00378	8.62	3.85	1084
<input type="checkbox"/>	Rod	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
<input type="checkbox"/>	Rod	Aluminum 50	53.5	0.00353	3.22	2.6	652

Material	Conductivity (%)	Tm (°C)	Kf	Area (mm ²)	Nominal Size
Copper anneal soft-drawn	100	1083	6.87652	94.0799	4/0AWG

Εικόνα 6.8

6.4 Ανάλυση Πλέγματος Γείωσης (Grid Analysis Module)

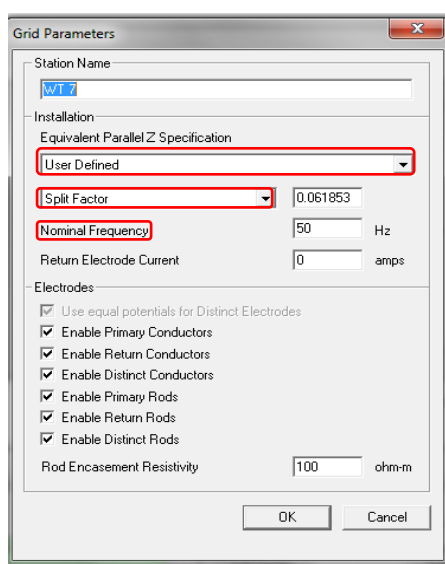
Μετά την διαστασιολόγηση των αγωγών γείωσης ακολουθεί η σχεδίαση του συστήματος γείωσης της Α/Γ. Επιλέγοντας την καρτέλα Asymmetrical Conductors εισάγουμε τις πληροφορίες των επιμέρους αγωγών του πλέγματος γείωσης (συντεταγμένες, πλήθος “στοιχείων”/αγωγό, υλικό, διατομή) σε πινακοποιημένη μορφή. Τα “στοιχεία” (elements) είναι δομικές μονάδες στις οποίες υποδιαιρείται κάθε αγωγός ώστε να προσομοιωθεί ο μηχανισμός διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στο έδαφος. Η αύξηση του αριθμού των “στοιχείων” (elements) οδηγεί συνήθως σε καλύτερη ακρίβεια ανάλυσης του πλέγματος, ωστόσο ο συνολικός τους αριθμός δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 3500 ($n \leq 3500$). Η επιλογή του πλήθους “στοιχείων” /αγωγό, n , έγινε βάση της σχέσης :

$$\frac{l}{n} > 0.275 m$$

,όπου l : το συνολικό μήκος του αγωγού σε m

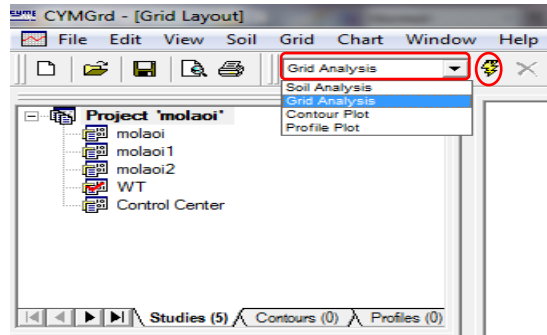
n : το πλήθος “στοιχείων” / αγωγό

Στην συνέχεια επιλέγοντας την ροή εντολών **Grid > Parameters** εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 6.9 στο οποίο επιλέγουμε την ρύθμιση User Defined εισάγοντας τον συντελεστή καταμερισμού S_f , που αντιστοιχεί στο εκάστοτε σύστημα γείωσης Α/Γ, και την συχνότητα του ρεύματος σφάλματος ($f = 50$ Hz).



Εικόνα 6.9

Αφού ορίσουμε τις παραμέτρους καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος, όπως φαίνεται στην παραπάνω καρτέλα, επιλέγουμε την μηχανή επίλυσης **Grid Analysis** και στην συνέχεια το εικονίδιο επίλυσης **Solve** (βλ. εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10

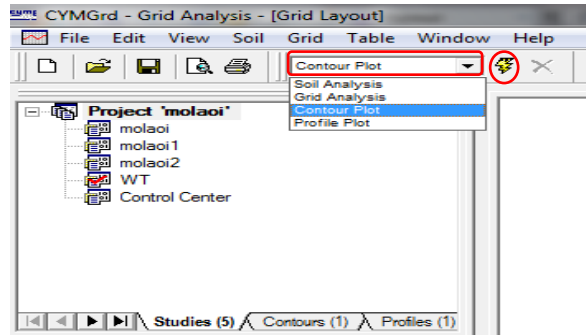
Ο επιλυτής **Grid Analysis** υπολογίζει το μέρος του εγχυόμενου ρεύματος σφάλματος προς γη $S_f \cdot I_f$, το οποίο διαχέεται από κάθε αγωγό στο περιβάλλον έδαφος. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης (R_g , GPR) περιέχονται στην καρτέλα **Grid Analysis** της εικόνας 6.11.

Parameters			
Equivalent Parallel Z Spec.	User Defined		
Split Factor	S_f	0.061853	
Nominal Frequency		50 hz	
Bus ID		20 KV	
LG Fault Current	I_f	833.3 amps	
Remote Contribution		100 %	
Upper Layer Thickness		2 meters	
Upper Layer Resistivity		730.55 ohm-m	
Lower Layer Resistivity		24175.9 ohm-m	
Output Results			
Parallel Z	6.6927 ohms	Ground Potential Rise	5234.57 volts
Decrement Factor	1.00048	Calculated Ground Resistance	101.511 ohms
		Equivalent Impedance	6.27874 ohms

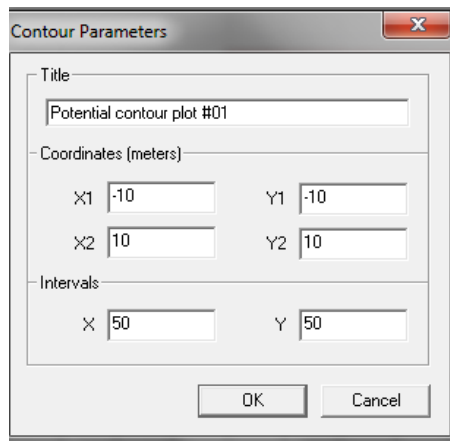
Εικόνα 6.11

6.5 Εξαγωγή Γραφημάτων (Plotting Module)

Μετά την ανάλυση του πλέγματος γείωσης το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Επιλέγοντας την μηχανή επίλυσης **Contour Plot** και στην συνέχεια το εικονίδιο επίλυσης **Solve** (βλ.εικόνα 6.12) εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 6.13.

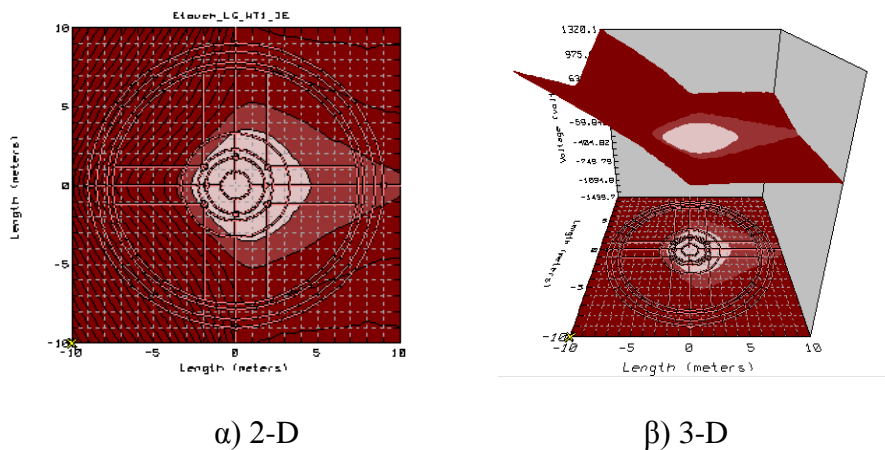


Εικόνα 6.12



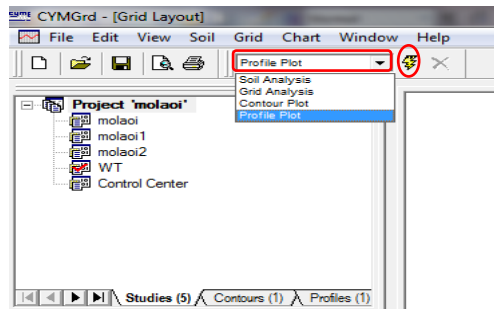
Εικόνα 6.13

Στο παραπάνω παράθυρο εισάγουμε την ονομασία του γραφήματος, τις συντεταγμένες του υπό εξέταση χωρίου καθώς και το πλήθος υποδιαίρεσεων (**intervals**) κατά τις διευθύνσεις x και y. Το γράφημα που προκύπτει δείχνει την κατανομή των τάσεων επαφής στο προεπιλεγθέν χωρίο (x_1, y_1, x_2, y_2), υπό μορφή χρωματικού κώδικα, δίνοντας μια εποπτική εικόνα τήρησης ή μη του αντίστοιχου ορίου ασφαλείας (βλ. εικόνα 6.14).



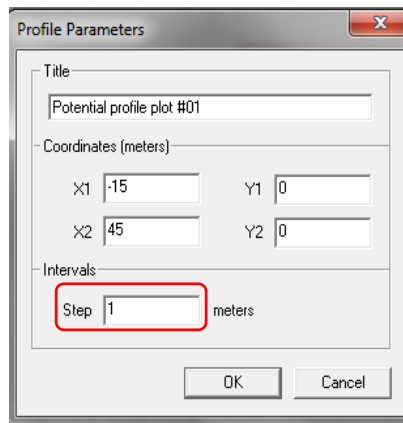
Εικόνα 6.14

Για την γραφική απεικόνιση των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) καθώς και του επιφανειακού δυναμικού κατά μήκος της διεύθυνσης ενός άξονα επιλέγουμε την μηχανή επίλυσης **Profile Plot**, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.15.

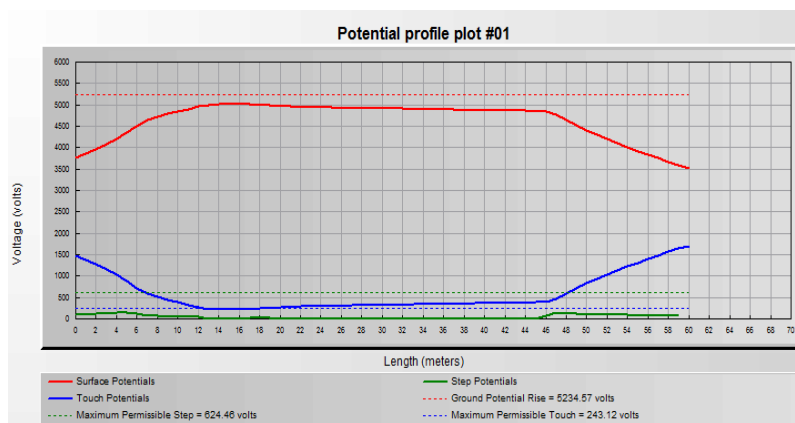


Εικόνα 6.15

Στην συνέχεια επιλέγοντας το εικονίδιο επίλυσης Solve εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 6.16, όπου εισάγουμε τον τίτλο του γραφήματος και τις συντεταγμένες της αρχής και του πέρατος του άξονα κατά μήκος του οποίου υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις. Το άνοιγμα βήματος (**step interval**) για τον υπολογισμό της βηματικής τάσης τίθεται ίσο με 1m, ώστε να υπάρχει συμφωνία με το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης φαίνεται γραφικά στην εικόνα 6.17.

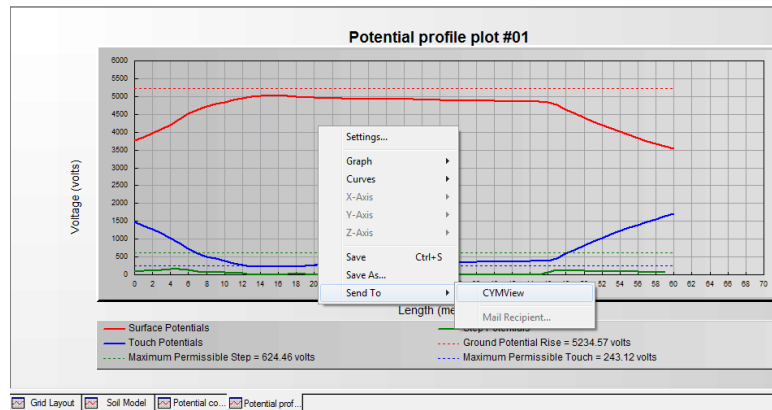


Εικόνα 6.16



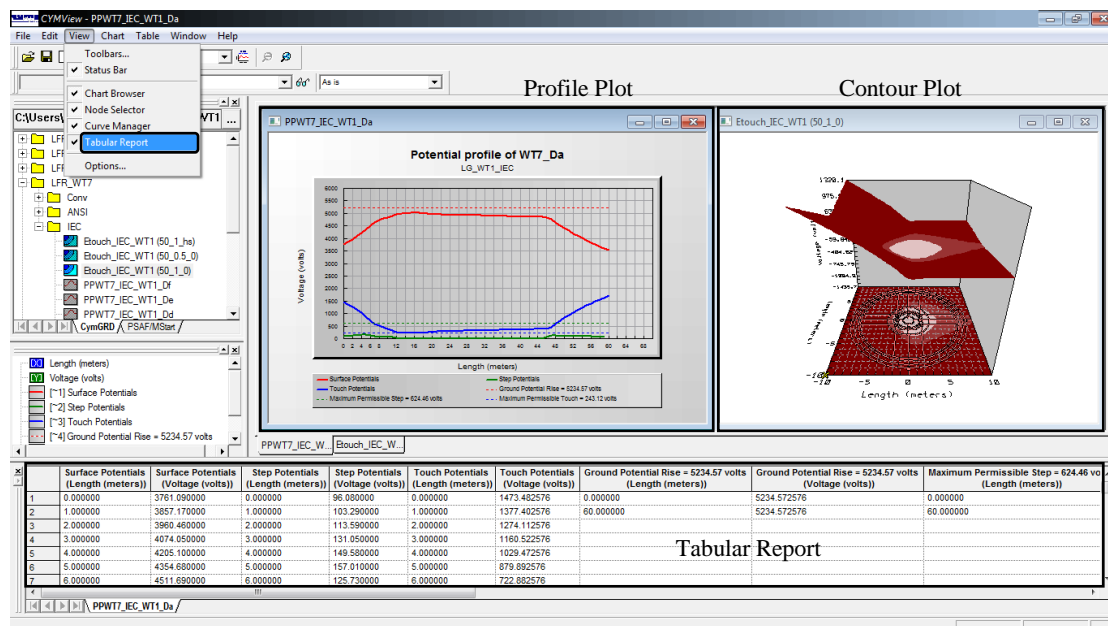
Εικόνα 6.17

Για να συγκρίνουμε δύο ή περισσότερα γραφήματα (Profile ή Contour Plots) από διαφορετικά Studies εξάγουμε τα αντίστοιχα γράφηματα στο πρόγραμμα CYMView επιλέγοντας την ροή εντολών **Send to > CYMView** (βλ. εικόνα 6.18). Το CYMView αποτελεί μια γενικής χρήσης εφαρμογή για την απεικόνιση και επεξεργασία των γραφημάτων που παράγονται από τους επιλυτές του CYMGrd.



Εικόνα 6.18

Επιλέγοντας την ροή εντολών **View > Tabular Report** από την γραμμή εργαλείων της εφαρμογής CYMView, οι καμπύλες των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) και του επιφανειακού δυναμικού δίνονται ισοδύναμα υπό μορφή πίνακος.

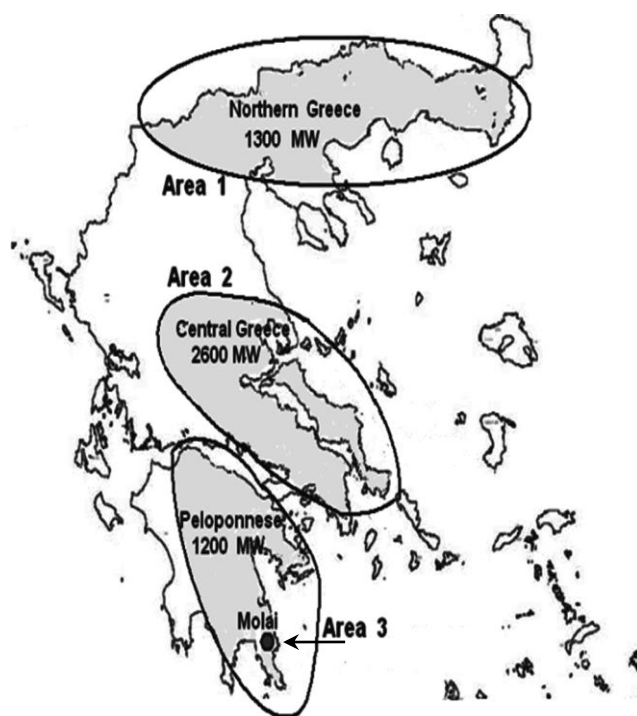


Εικόνα 6.19

Κεφάλαιο 7

Υπολογιστική προσομοίωση σφαλμάτων σε δίκτυο ΜΤ με κατανεμημένη παραγωγή (Αιολικό Πάρκο)

Όπως προαναφέρθηκε ο υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος σε ηλεκτρικά δίκτυα και εγκαταστάσεις αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό και ταυτόχρονα αρκετά πολύπλοκο πεδίο επιστημονικής εφαρμογής, το οποίο όμως είναι απαραίτητο κατά την προκαταρκτική σχεδίαση ενός δικτύου, τόσο για την προστασία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού όσο και για την ανθρώπινη ασφάλεια. Στο πνεύμα αυτής της λογικής έχουν αναπτυχθεί αρκετά λογισμικά, στηριζόμενα κυρίως σε μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, προς την κατεύθυνση διευκόλυνσης αυτού του εγχειρήματος. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PSAF (Power System Analysis Framework) της καναδέζικης εταιρίας Cyme International για την προσομοίωση ασύμμετρων σφαλμάτων σε ένα υφιστάμενο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης (ΜΤ) με κατανεμημένη παραγωγή (Αιολικό Πάρκο - Α/Π). Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η λειτουργία υπό συνθήκες σφάλματος ενός Α/Π εννέα (9) ανεμογεννητριών τύπου V-52 [23], συνολικής ισχύος 7,65 MW, το οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο στο Δήμο Μολάων στη περιοχή 'Μάλι Μάδι' (βλ. εικόνα 7.1).

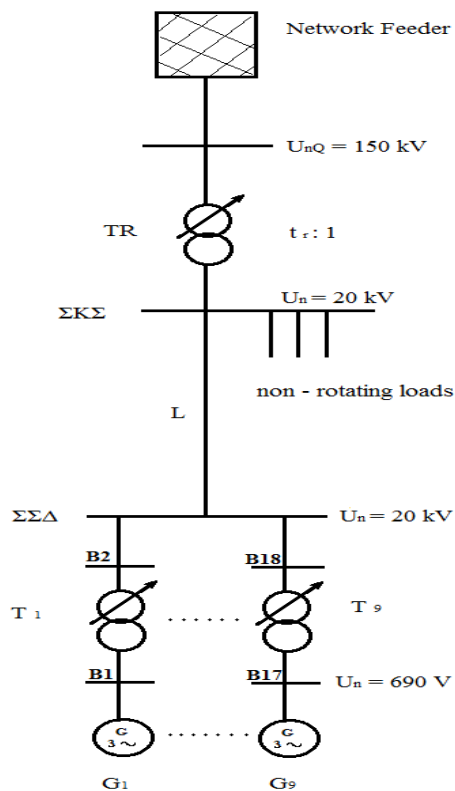


(α)



(β)

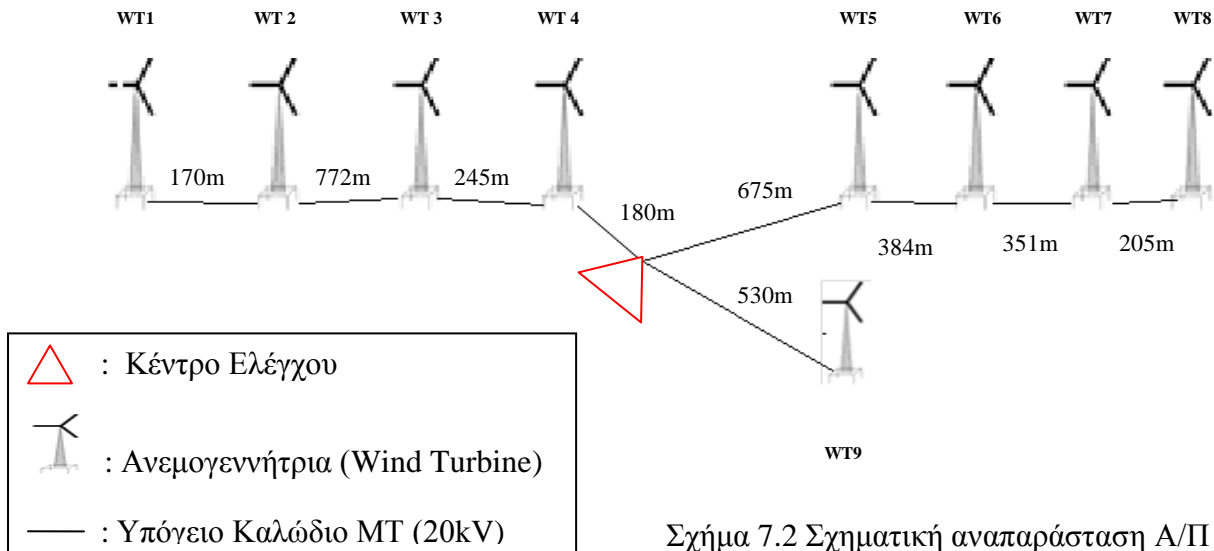
Εικόνα 7.1 (α) Γεωγραφική κατανομή Αιολικών Πάρκων στην Ηπειρωτική Ελλάδα
 (β) Τοποθεσία εγκατάστασης Α/Π Μολάων (δορυφορική φωτογραφία)



Σχήμα 7.1 Μονογραμμικό διάγραμμα Δικτύου Διανομής ΜΤ

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.1, το δίκτυο τροφοδότησης ΥΤ συνδέεται στον ζυγό των 150 kV του υποσταθμού ΥΤ / ΜΤ, όπου παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού 150/21kV ονομαστικής ισχύος 50MVA (σύστημα ψύξης ONAF). Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού βρίσκεται σε συνδεσμολογία Dyn1 με γειωμένο ουδέτερο τυλίγματος ΧΤ μέσω αντίστασης 12 Ohm, ενώ είναι εφοδιασμένος στο

τύλιγμα ΥΤ με σύστημα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) 17 διακριτών λήψεων [24]. Από τον ζυγό ΜΤ (20kV) μέχρι το κέντρο ελέγχου του Α/Π μεσολαβεί υπόγειο τριπολικό καλώδιο ΜΤ μήκους 3 km και εναέρια γραμμή ΜΤ τύπου ACSR μήκους 1.5 km ακολουθούμενο από υπόγειο καλώδιο ΜΤ μήκους 4 km. Από το κέντρο ελέγχου αναχωρούν επίσης υπόγεια καλώδια των 20kV, τα οποία συνδέουν του τρεις κλάδους ανεμογεννητριών μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 7.2 Σχηματική αναπαράσταση Α/Π

Δίκτυο Τροφοδότησης ΥΤ	$Q: U_{nQ} = 150 \text{ kV}, S_{kQ}'' = 1062 \text{ MVA}, R_Q / X_Q = 0.4$
Μετασχηματιστής Δικτύου	$TR: S_{rT} = 50 \text{ MVA}, u_{krT} = 25\%, u_{kRrT} = 0.35\%, P_{krT} = 174 \text{ kW},$ $t_r = 150 \left(\begin{matrix} +7.5\% \\ -12.5\% \end{matrix} \right) / 21 \text{ kV}, R_g = 12 \text{ Ohm}, Dyn11$
Α/Π Μολάων	$9 \times 850 \text{ kW (WT1 - WT9)}$
Ανεμογεννήτρια	$DFIG \text{ (WT1 - WT9): } P_{rG} = 850 \text{ kW}, U_{rG} = 690 \text{ V}, I_{rG} = 710 \text{ A},$ $I_{LR} = 5.7 \text{ kA}, \cos \varphi_{rG} = 1, s = 8\%, Y_g$
Μετασχηματιστής	$T1-T9: S_{rT} = 895 \text{ kVA}, u_{krT} = 5.2\%, u_{kRrT} = 0.4\%, P_{krT} = 9 \text{ kW},$ $t_r = 20 (\pm 5\%) / 0.69 \text{ kV}, R_g = 0 \text{ Ohm}, Dyn11$
Γραμμή Διασύνδεσης	$L: \text{ υπόγειο καλώδιο XLPE } 3 \times 240 \text{ mm}^2 + 25 \text{ mm}^2 \text{ Al}, l = 3 \text{ km}$ $R_1 = 0.161 \text{ Ohm / km}, X_1 = 0.1059 \text{ Ohm / km}, B_1 = 97.4 \mu\text{S / km}$ $R_0 = 1.092 \text{ Ohm / km}, X_0 = 0.8 \text{ Ohm / km}, B_0 = 97.4 \mu\text{S / km}$ εναέρια γραμμή 20kV ACSR $3 \times 95 \text{ mm}^2, l = 1.5 \text{ km}$ $R_1 = 0.215 \text{ Ohm / km}, X_1 = 0.334 \text{ Ohm / km}$ $R_0 = 0.363 \text{ Ohm / km}, X_0 = 1.556 \text{ Ohm / km}$ υπόγειο καλώδιο XLPE $3 \times 240 \text{ mm}^2 + 25 \text{ mm}^2 \text{ Al}, l = 4 \text{ km}$ $R_1 = 0.161 \text{ Ohm / km}, X_1 = 0.1059 \text{ Ohm / km}, B_1 = 97.4 \mu\text{S / km}$ $R_0 = 1.092 \text{ Ohm / km}, X_0 = 0.8 \text{ Ohm / km}, B_0 = 97.4 \mu\text{S / km}$

Πίνακας 7.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του Δικτύου ΜΤ

Βασικό στάδιο κατά την μελέτη και σχεδίαση συστημάτων γείωσης είναι ο προσδιορισμός του μέγιστου ρεύματος σφάλματος προς γη $I_{f_{\max}}$, που οδηγεί στην υψηλότερη τιμή του μέγιστου ρεύματος πλέγματος $I_{G_{\max}}$ και άρα στις μέγιστες δυνατές αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής). Κατά το προσδιορισμό λοιπόν του χειρότερου τύπου σφάλματος για δοσμένο σύστημα γείωσης, εξετάζονται το μονοφασικό και το διφασικό σφάλμα προς γη καθώς μόνο αυτά ‘ενεργοποιούν’ το σύστημα γείωσης μέσω του ομοπολικού ρεύματος, $3I_0$.

Με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε και τις δυνατές επιλογές που προσφέρει το λογισμικό PSAF, η προσομοίωση των ασύμμετρων σφαλμάτων στηρίχθηκε στην :

α) Μέθοδο Ισοδύναμης πηγής τάσης (Πρότυπο IEC 60909)

β) Μέθοδο E / X (Πρότυπο ANSI/IEEE C 37.010)

γ) Συμβατική Μέθοδο σε συνδυασμό με Ανάλυση Ροής Φορτίου (Conventional Fault Analysis)

Το κύριο ζήτημα που ανακύπτει είναι η επιλογή των ηλεκτρικών μεγεθών σύγκρισης των τριών εναλλακτικών τρόπων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA). Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται ο τύπος του ρεύματος σφάλματος (duty type) που απαιτείται για την μελέτη απόκρισης ενός συστήματος γείωσης για κάθε μια από τις τρεις μεθόδους, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 3, 4 και στο εδάφιο 5.3.3.

Μέθοδος	Duty type	Μορφή RMS Ρεύματος	Σχόλια / Παραδοχές
IEC 60909	Initial	Symmetrical	$Z_f = 0 / c = c_{\max}$
ANSI C 37.010	First Cycle	Symmetrical	$Z_f = 0 / k \cdot X_d''$
CFA	Subtransient	Symmetrical	$Z_f = 0 / X_d''$

Πίνακας 7.2 Αντιστοιχία τύπων ρεύματος σφάλματος για τις μεθόδους IEC / ANSI / CFA

Με βάση τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους, υπολογίστηκε με χρήση του λογισμικού PSAF η ένταση του ρεύματος σφάλματος, $I_f = 3 I_0$, για μονοφασικό (LG) και διφασικό σφάλμα προς γη (LLG) σε κάθε μια από τις 9 Α/Γ, στην πλευρά ΜΤ (20 kV) καθώς και στην πλευρά ΧΤ (0,69kV). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σφάλματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί :

IEC 60909					
		LG	LLG	wft	
WT ID	BusID	I_f [kA]	I_f [kA]	$I_{f\ max}$	U_n
WT1	B2	0,8333	0,4409	0,8333	> 1kV
WT2	B4	0,8272	0,4386	0,8272	
WT3	B6	0,8083	0,4307	0,8083	
WT4	B8	0,8041	0,429	0,8041	
WT5	B10	0,8215	0,436	0,8215	
WT6	B12	0,8123	0,4322	0,8123	
WT7	B14	0,8039	0,4287	0,8039	
WT8	B16	0,7955	0,4253	0,7955	
WT9	B18	0,8239	0,4373	0,8239	
WT1	B1	22,0887	26,6253	26,6253	< 1kV
WT2	B3	22,0743	26,6154	26,6154	
WT3	B5	22,0278	26,5824	26,5824	
WT4	B7	22,0171	26,5749	26,5749	
WT5	B9	22,0611	26,6058	26,6058	
WT6	B11	22,0278	26,5899	26,5899	
WT7	B13	22,0171	26,5749	26,5749	
WT8	B15	21,9954	26,5596	26,5596	
WT9	B17	22,0659	26,6094	26,6094	
ANSI C 37.010					
		LG	LLG	wft	
WT ID	BusID	I_f [kA]	I_f [kA]	$I_{f\ max}$	U_n
WT1	B2	0,7113	0,3734	0,7113	> 1kV
WT2	B4	0,7065	0,3714	0,7065	
WT3	B6	0,6914	0,3653	0,6914	
WT4	B8	0,6881	0,3639	0,6881	
WT5	B10	0,7019	0,3694	0,7019	
WT6	B12	0,6947	0,3664	0,6947	
WT7	B14	0,6879	0,3637	0,6879	
WT8	B16	0,6812	0,361	0,6812	
WT9	B18	0,7038	0,3705	0,7038	
WT1	B1	21,9837	26,5441	26,5441	< 1kV
WT2	B3	21,9674	26,5323	26,5323	
WT3	B5	21,914	26,4936	26,4936	
WT4	B7	21,9017	26,4848	26,4848	
WT5	B9	21,9521	26,5212	26,5212	
WT6	B11	21,9263	26,5026	26,5026	
WT7	B13	21,9019	26,4851	26,4851	
WT8	B15	21,8766	26,4667	26,4667	
WT9	B17	21,9574	26,525	26,525	

		<i>Conventional Fault Analysis</i>			
		LG	LLG	wft	
WT ID	BusID	I_f [kA]	I_f [kA]	$I_{f\ max}$	U_n
WT1	B2	0,7576	0,3977	0,7576	> 1kV
WT2	B4	0,7528	0,3958	0,7528	
WT3	B6	0,7372	0,3896	0,7372	
WT4	B8	0,7338	0,3882	0,7338	
WT5	B10	0,7484	0,394	0,7484	
WT6	B12	0,741	0,391	0,741	
WT7	B14	0,7341	0,3882	0,7341	
WT8	B16	0,727	0,3854	0,727	
WT9	B18	0,7495	0,3946	0,7495	
WT1	B1	23,4718	28,3449	28,3449	< 1kV
WT2	B3	23,4633	28,3429	28,3429	
WT3	B5	23,4241	28,3233	28,3233	
WT4	B7	23,4131	28,3165	28,3165	
WT5	B9	23,4613	28,3487	28,3487	
WT6	B11	23,4475	28,3451	28,3451	
WT7	B13	23,4296	28,3364	28,3364	
WT8	B15	23,4068	28,322	28,322	
WT9	B17	23,4414	28,3218	28,3218	

Πίνακας 7.3 Ένταση ρεύματος σφάλματος (I_f) για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη σε κάθε ζυγό του Α/Π με 3 τρόπους υπολογισμού (IEC/ANSI/CFA)

Παρατηρούμε ότι και οι τρεις μέθοδοι δίνουν ως χειρότερο τύπο σφάλματος (worst fault type) στην πλευρά ΜΤ το μονοφασικό σφάλμα ($I_{f\ max} = I_{f\ LG}$) ενώ στην πλευρά ΧΤ το διφασικό σφάλμα προς γη ($I_{f\ max} = I_{f\ LLG}$). Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 4.4.2 η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται ώστε το μονοφασικό σφάλμα να δίνει το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος ($I_{f\ LG} > I_{f\ LLG}$) είναι $Z_o > Z_1$, ενώ με $Z_o < Z_1$ στη θέση σφάλματος το διφασικό σφάλμα προς γη παρουσιάζει το μέγιστο ρεύμα σφάλματος ($I_{f\ LLG} > I_{f\ LG}$). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με τις προαναφερθείσες θεωρητικές ανισότητες κατάταξης των διαφόρων τύπων σφάλματος, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.4, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα αυτών. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 7.4 που ακολουθεί φαίνονται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ (ισοδύναμη Thevenin) θετικής ακολουθίας, $Z_1 = Z_2$, και μηδενικής ακολουθίας, Z_o , σε κάθε θέση σφάλματος στην πλευρά ΜΤ/ΧΤ, όπως προέκυψαν με βάση το πρότυπο IEC.

WT ID	BusID	$ Z_o $ [pu]	$\angle Z_o$ ($^\circ$)	$ Z_1 $ [pu]	$\angle Z_1$ ($^\circ$)	U_n
WT1	B2	10,6056	11,42	0,709	68,83	> 1kV [$Z_o > Z_1$]
WT2	B4	10,6601	11,46	0,72	68,06	
WT3	B6	10,8321	11,58	0,7569	65,58	
WT4	B8	10,8699	11,61	0,7656	65,02	
WT5	B10	10,716	11,49	0,7299	67,44	
WT6	B12	10,8016	11,56	0,7474	66,38	
WT7	B14	10,8797	11,61	0,7645	65,25	
WT8	B16	10,9578	11,67	0,7826	64,13	
WT9	B18	10,7016	11,96	0,7276	67,38	
WT1	B1	2,7485	86,19	4,8778	83,01	< 1kV [$Z_o < Z_1$]
WT2	B3	2,7485	86,19	4,8818	82,93	
WT3	B5	2,7485	86,19	4,899	82,35	
WT4	B7	2,7485	86,19	4,8986	82,6	
WT5	B9	2,7485	86,19	4,8858	82,86	
WT6	B11	2,7485	86,19	4,8923	82,74	
WT7	B13	2,7485	86,19	4,8985	82,62	
WT8	B15	2,7485	86,19	4,905	82,49	
WT9	B17	2,7485	86,19	4,8845	82,86	

Πίνακας 7.4 Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ θετικής και μηδενικής ακολουθίας σε κάθε ζυγό του Α/Π με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σφάλματος κατά IEC

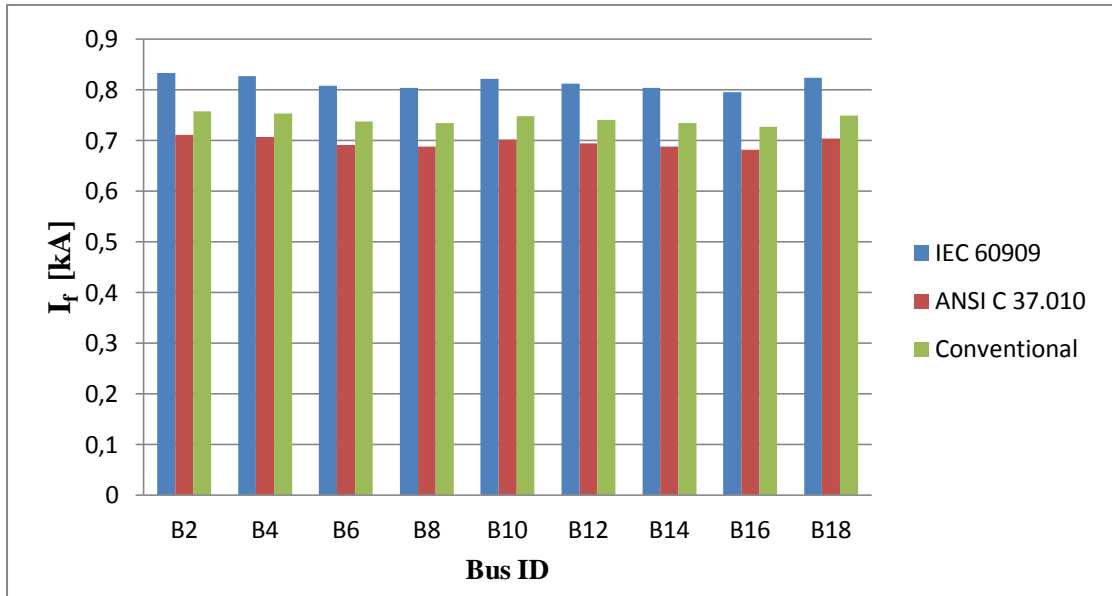
```

SHORT CIRCUIT STUDY PARAMETERS
Study : : ST_1
Time : Mon Jan 09 14h40m17s 2012
Base power : 100.00 [MVA]
Fundamental frequency: 50.00 [hz]
Study protocol : IEC
Fault Current type: MAXIMUM
Duty type : Initial
Prefault voltages = Base voltages
Study name : ST_1
$
DETAILED REPORT
-----
BUS IDENT. INIT.[kV] ANGLE[deg]
          [p.u.] CURRENT [deg] [A] POWER [MVA] VOLTAGE(P-G) [p.u.] [deg] [kV]
-----
[*]Faulted Bus ->
B2 Prefault kV 20.00 0.00
B2 LLL-A 1.5511 -68.83 4478 155 0.0000 0.0000 0.00
B2 LG-A 0.2887 -17.42 833 29 0.0000 0.0000 0.00
B2 LLG-B 1.4072 -160.58 4062 141 0.0000 0.0000 0.00
B2 LLG-C 1.2808 23.09 3692 128 0.0000 0.0000 0.00
B2 [Z00-1 = 0.2561 +j 0.6613 (p.u.)] R/X = 0 0.3872
B2 I"k3 = 4478 I"k1 = 833 I"k2 = 0
B2 [Z00-0 = 10.3955 +j 2.1006 (p.u.)]

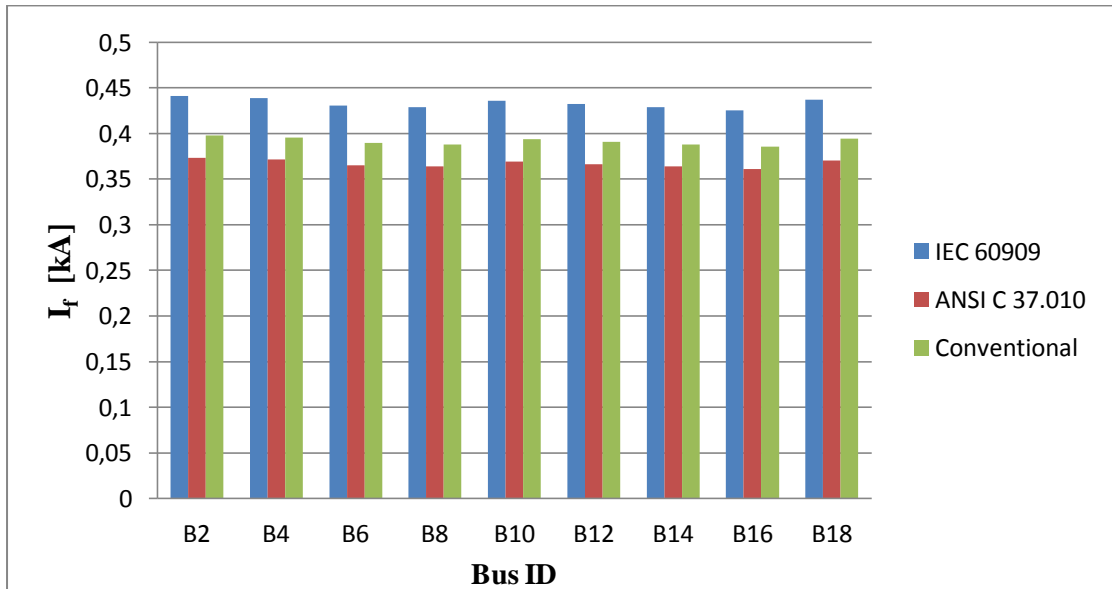
```

Εικόνα 7.2 Έκθεση αποτελεσμάτων σύνθετης αντίστασης β/κ (Z_1 , Z_o) στον ζυγό σφάλματος B2 σύμφωνα με τον επιλυτή Fault Analysis IEC του λογισμικού PSAF

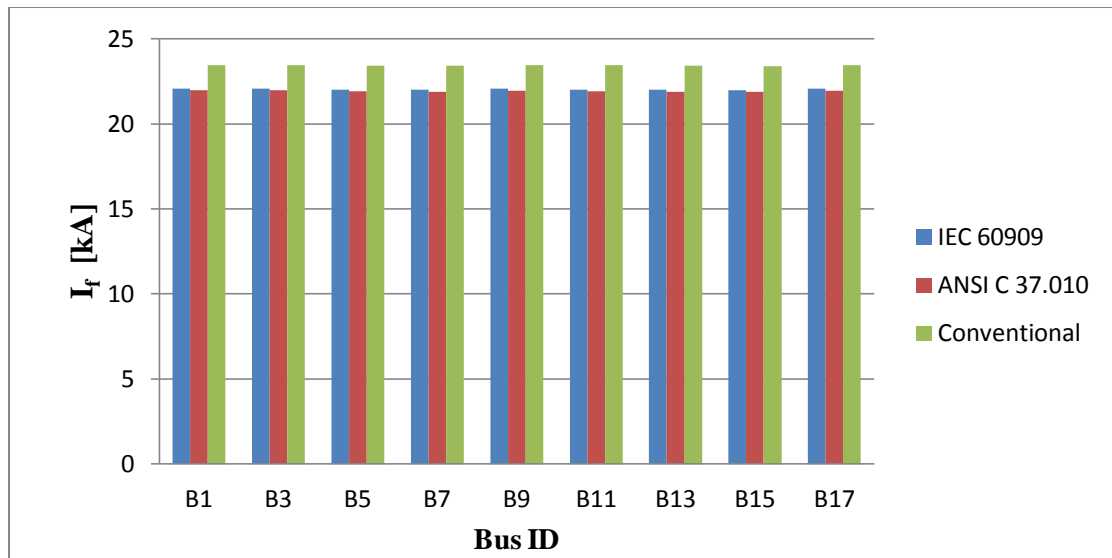
Για την συγκριτική αντιπαράθεση των τριών μεθόδων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC 60909, ANSI C 37.010, Conventional Fault Analysis), στα επόμενα σχήματα, απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σφάλματος του πίνακα 7.3 :



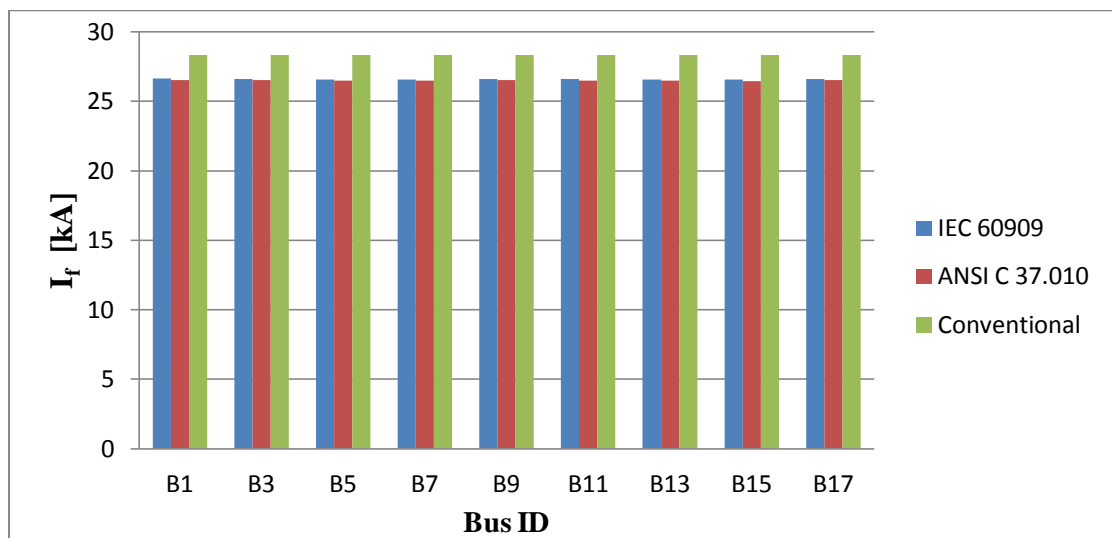
Σχήμα 7.3 Ένταση ρεύματος σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα στον ζυγούς MT



Σχήμα 7.4 Ένταση ρεύματος σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γή στους ζυγούς MT



Σχήμα 7.5 Ένταση ρεύματος σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς XT



Σχήμα 7.6 Ένταση ρεύματος σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γή στους ζυγούς XT

Με βάση τα σχήματα 7.3 – 7.6 παρατηρούμε τα εξής :

- Στην πλευρά XT (0.69 kV) και για μονοφασικό και για διφασικό σφάλμα προς γή η μέγιστη αναμενόμενη τιμή ρεύματος σφάλματος αντιστοιχεί στην συμβατική μέθοδο (Conventional Fault Study) σε αντίθεση με την πλευρά MT (20 kV), όπου το πρότυπο IEC δίνει την πιο απαισιόδοξη (μέγιστη) εκτίμηση έντασης ρεύματος σφάλματος.

- Για κάθε τύπο και θέση σφάλματος στην πλευρά MT και XT το πρότυπο ANSI δίνει την μικρότερη αναμενόμενη ένταση ρεύματος σφάλματος, I_f , δηλαδή την πιο αισιόδοξη (ελάχιστη) εκτίμηση ρεύματος σφάλματος.

- Για κάθε τύπο και θέση σφάλματος στην πλευρά MT και XT το πρότυπο IEC παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση ρεύματος σφάλματος σε σχέση με την αντίστοιχη του προτύπου ANSI, λόγω του συντελεστή διόρθωσης τάσης c [4, 22, 25, 26] .

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή ενός ποσοτικού δείκτη που να περιγράφει τις σχετικές αποκλίσεις του ρεύματος σφάλματος, που συνεπάγονται από τους διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού αυτού (IEC, ANSI, CFA).

Ορίζουμε λοιπόν, την μέση ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των ρευμάτων σφάλματος δύο (2) διαφορετικών μεθόδων (**Average Percentage Difference** i/ii) ως εξής :

$$APD_{i/ii} (\%) = \frac{\sum_{j=1}^N [\Delta I_f (\%)]_j}{N}, \text{ όπου } \Delta I_f (\%) = \frac{I_f^i - I_f^{ii}}{\min(I_f^i, I_f^{ii})} \cdot 100 \text{ και } N : \text{πλήθος A/T}$$

Ο δείκτης APD είναι προτιμότερο να εκφράζεται ως προς την πιο αισιόδοξη μέθοδο υπολογισμού, έτσι ώστε να υπάρχει κοινός παρονομαστής σύγκρισης $\min(I_f^i, I_f^{ii})$. Εκμεταλλευόμενοι την 2^η παρατήρηση, σύμφωνα με την οποία το πρότυπο ANSI δίνει την ελάχιστη αναμενόμενη τιμή ρεύματος σφάλματος για κάθε τύπο και θέση σφάλματος, υπολογίζουμε τον δείκτη APD ως προς τις τιμές ρεύματος σφάλματος του προτύπου ANSI (δηλαδή $ii \leftarrow \text{ANSI}$ και $\min(I_f^i, I_f^{ii}) = I_f^{ii}$ με $i \leftarrow \text{IEC/CFA}$), για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και XT :

$$APD_{LG}^{IEC/ANSI} (\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[\frac{I_{f_{LG}}^{IEC} - I_{f_{LG}}^{ANSI}}{I_{f_{LG}}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

$$APD_{LLG}^{IEC/ANSI} (\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[\frac{I_{f_{LLG}}^{IEC} - I_{f_{LLG}}^{ANSI}}{I_{f_{LLG}}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

$$APD_{LG}^{CFA/ANSI} (\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[\frac{I_{f_{LG}}^{CFA} - I_{f_{LG}}^{ANSI}}{I_{f_{LG}}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

$$APD_{LLG}^{CFA/ANSI} (\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[\frac{I_{f_{LLG}}^{CFA} - I_{f_{LLG}}^{ANSI}}{I_{f_{LLG}}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο πίνακας με την μέση ποσοστιαία απόκλιση ρεύματος σφάλματος (APD) μεταξύ IEC / ANSI και CFA / ANSI, για κάθε τύπο σφάλματος στην πλευρά MT/XT.

	IEC / ANSI		CFA / ANSI	
	LG	LLG	LG	LLG
Bus ID	ΔI_f (%)	ΔI_f (%)	ΔI_f (%)	ΔI_f (%)
B2	17,15	18,08	6,51	6,51
B4	17,08	18,09	6,55	6,57
B6	16,91	17,90	6,62	6,65
B8	16,86	17,89	6,64	6,68
B10	17,04	18,03	6,62	6,66
B12	16,93	18,96	6,66	6,71
B14	16,86	17,87	6,72	6,74
B16	16,78	17,81	6,72	6,76
B18	17,06	18,03	6,49	6,50
APD(%)	17,0	18,0	6,6	6,6
B1	0,48	0,31	6,77	6,78
B3	0,49	0,31	6,81	6,82
B5	0,52	0,34	6,89	6,91
B7	0,53	0,34	6,90	6,92
B9	0,50	0,32	6,87	6,89
B11	0,46	0,33	6,94	6,95
B13	0,53	0,34	7,98	6,99
B15	0,54	0,35	7,99	7,01
B17	0,49	0,32	6,76	6,77
APD(%)	0,5	0,3	6,9	6,9

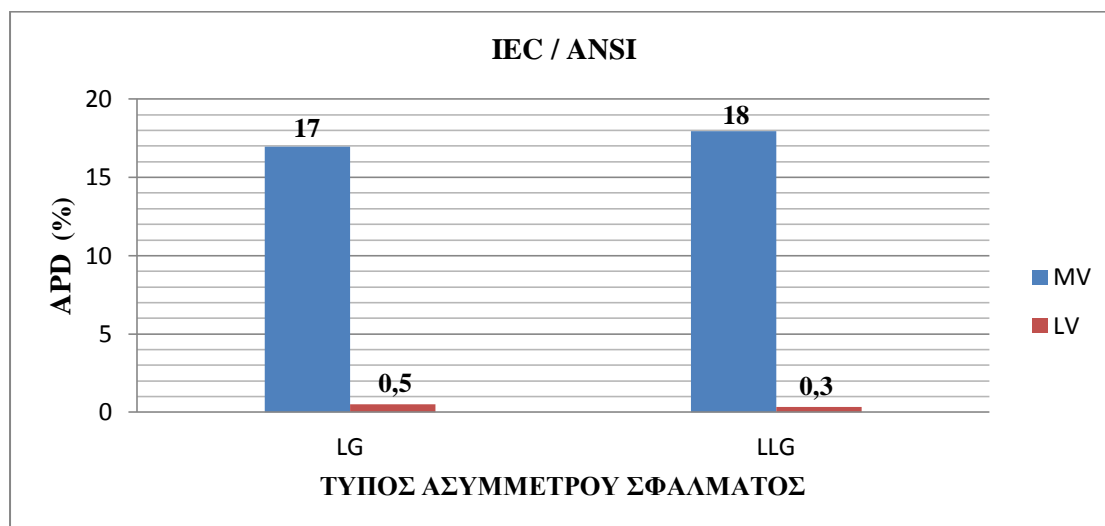
Πίνακας 7.5 Μέση ποσοστιαία απόκλιση ρεύματος σφάλματος (APD) για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και XT

Συγκρίνοντας τους δείκτες APD των μεθόδων IEC/ANSI, για κάθε τύπο σφάλματος στην MT και XT, παρατηρούμε τα εξής :

- Για μονοφασικό σφάλμα στην MT, η μέση απόκλιση ρεύματος σφάλματος είναι 17% ($APD_{LG/MV}^{IEC/ANSI} = 17\%$) ενώ στην XT μειώνεται μόλις στο 0,5% ($APD_{LG/LV}^{IEC/ANSI} = 0,5\% \rightarrow 0\%$), δηλαδή σχεδόν εξαλείφεται. Αυτό σημαίνει ότι για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά MT (20kV) το πρότυπο IEC δίνει περίπου 17% μεγαλύτερο ρεύμα σφάλματος σε σχέση με το αντίστοιχο που υπολογίζεται με βάση το πρότυπο ANSI, ενώ στη XT (0,69kV) τα δύο πρότυπα (IEC / ANSI) σχεδόν συμφωνούν, δίνοντας περίπου ίδιο μονοφασικό ρεύμα σφάλματος.
- Για διφασικό σφάλμα προς γη στην MT, η μέση απόκλιση ρεύματος σφάλματος είναι 18% ($APD_{LLG/MV}^{IEC/ANSI} = 18\%$) ενώ στην XT μειώνεται μόλις στο 0,3% ($APD_{LLG/LV}^{IEC/ANSI} = 0,3\% \rightarrow 0\%$), δηλαδή σχεδόν εξαλείφεται. Αυτό σημαίνει ότι για διφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT (20kV) το πρότυπο IEC δίνει περίπου 18% μεγαλύτερο ρεύμα σφάλματος σε σχέση με το αντίστοιχο που υπολογίζεται με

βάση το πρότυπο ANSI, ενώ στη XT (0,69kV) τα δύο πρότυπα (IEC / ANSI) σχεδόν συμφωνούν, δίνοντας περίπου ίδιο ρεύμα σφάλματος.

Σύμφωνα με τις παραπάνω επισημάνσεις ο υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος στην πλευρά MT, με χρήση των προτύπων IEC / ANSI, συνεπάγεται αποκλίσεις της τάξεως του 17% περίπου για μονοφασικό σφάλμα και 18% για διφασικό σφάλμα προς γη, αποκλίσεις οι οποίες στην πλευρά XT σχεδόν εκμηδενίζονται πέφτοντας στο 0,5% και 0,3% αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



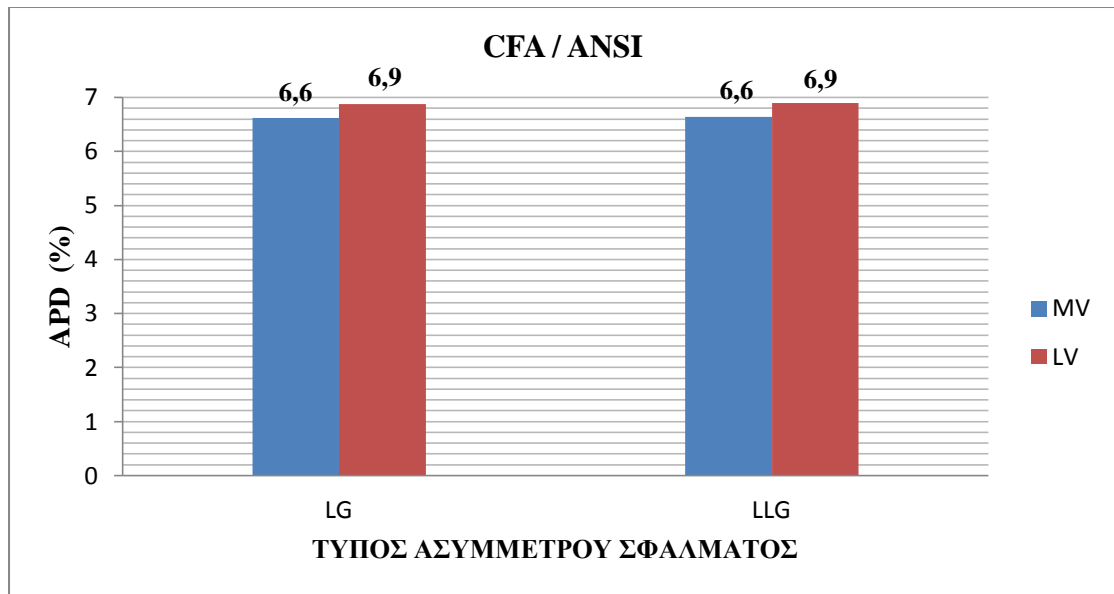
Σχήμα 7.7 Μέση ποσοστιαία απόκλιση του ρεύματος σφάλματος των προτύπων IEC / ANSI για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και XT

Συγκρίνοντας τους δείκτες APD των μεθόδων CFA/ANSI, για κάθε τύπο σφάλματος στην MT και XT, παρατηρούμε τα εξής :

- Στην πλευρά MT, η συμβατική μέθοδος (Conventional method) παρουσιάζει και για τους δύο εξεταζόμενους τύπους ασύμμετρου σφάλματος (LG / LLG) ίδια μέση απόκλιση ρεύματος σφάλματος ως προς την μέθοδο ANSI, ($APD_{LG/MV}^{CFA/ANSI} = APD_{LLG/MV}^{CFA/ANSI} = 6,6\%$).

- Ομοίως στην πλευρά XT, η συμβατική μέθοδος (Conventional method) παρουσιάζει και για τους δύο εξεταζόμενους τύπους ασύμμετρου σφάλματος (LG / LLG) ίδια μέση απόκλιση ρεύματος σφάλματος ως προς την μέθοδο ANSI, ($APD_{LG/LV}^{CFA/ANSI} = APD_{LLG/LV}^{CFA/ANSI} = 6,9\%$).

Σύμφωνα με τις παραπάνω επισημάνσεις η συμβατική μέθοδος παρουσιάζει σχεδόν σταθερή % απόκλιση ρεύματος σφάλματος ως προς την μέθοδο ANSI, για κάθε τύπο ασύμμετρου σφάλματος (LG / LLG) τόσο στην πλευρά MT όσο και στην XT, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 7.8 Μέση ποσοστιαία απόκλιση του ρεύματος σφάλματος των μεθόδων CFA / ANSI για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και XT

Κεφάλαιο 8

Υπολογιστική προσομοίωση απόκρισης συστήματος γείωσης Αιολικού Πάρκου υπό συνθήκες σφάλματος

8.1 Γενικά

Το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου πρέπει να εξασφαλίζει την προστασία τόσο των ατόμων που βρίσκονται σ' αυτό όσο και του εξοπλισμού, κατά την περίπτωση βραχυκυκλώματος. Τα ελληνικά αιολικά πάρκα κατασκευάζονται συνήθως σε κορυφογραμμές με βραχώδες ή ημιβραχώδες έδαφος, με συνέπεια η ειδική αντίσταση του εδάφους να παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, ενώ η διαθέσιμη περιοχή για το σύστημα γείωσης είναι συνήθως περιορισμένη. Για αυτούς τους λόγους κυρίως, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν είναι εφικτή η κατασκευή συστήματος γείωσης σε κάθε ανεμογεννήτρια, που να παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση γείωσης ($< 10 \Omega$). Γι' αυτό είναι απαραίτητη η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή που θα τοποθετηθεί το σύστημα γείωσης, ώστε να είναι δυνατός ο ακριβέστερος υπολογισμός των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης. Το τελικό κριτήριο λοιπόν, κατά την σχεδίαση ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης δεν πρέπει να είναι μόνο η ελαχιστοποίηση της αντίστασης γείωσης του πάρκου αλλά κυρίως η τήρηση των επιτρεπτών ορίων ασφαλείας από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, όπως ορίζει το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [15].

8.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

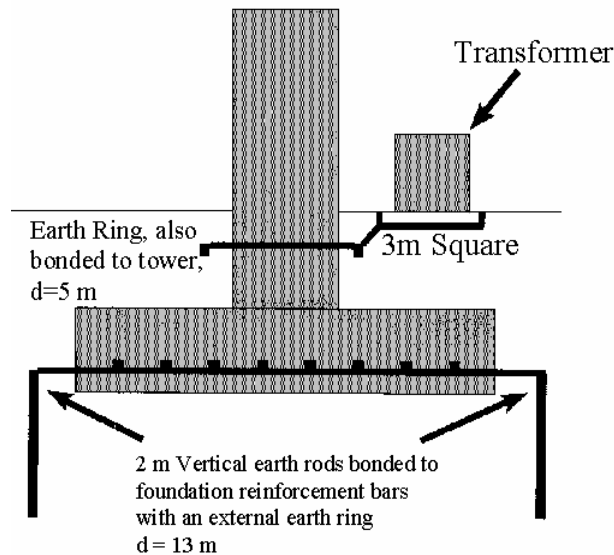
Η μεθοδολογία που ακολουθείται εκτενώς κατά την διαδικασία σχεδίασης του συστήματος γείωσης ενός Αιολικού Πάρκου στην χώρα μας, συντίθεται από τα εξής βήματα [27] :

1. Καθορισμός της μέγιστης τιμής ρεύματος σφάλματος του αιολικού πάρκου.
2. Επιλογή των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και των κέντρων ελέγχου.
3. Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας ή κέντρου ελέγχου.
4. Εντοπισμός άλλων θέσεων στο αιολικό πάρκο που θα μπορούσαν να μειώσουν την αντίσταση γείωσης (πηγάδια, χώμα κ.λπ.).
5. Υπολογισμός του μοντέλου εδάφους, βάσει μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για όλες τις θέσεις στις οποίες έχουμε μετρήσεις.
6. Σχεδιασμός τυπικού πλέγματος γείωσης, για κάθε ανεμογεννήτρια ή υποσταθμό.
7. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης.

8. Υπολογισμός του εγχυόμενου ρεύματος σφάλματος σε κάθε σύστημα γείωσης.
9. Υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς βηματικής τάσης και της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς τάσεως επαφής για κάθε σύστημα γείωσης.
10. Υπολογισμός της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης.
11. Έλεγχος των τιμών των παραπάνω μεγεθών. Είναι επιθυμητό:
 - η συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου να είναι μικρότερη από 1Ω ,
 - η αντίσταση γείωσης της κάθε ανεμογεννήτριας να είναι μικρότερη από 10Ω ,
 - οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής να μην ξεπερνούν τα ασφαλή όρια, όπως αυτά ορίζονται από το Πρότυπο [15].
12. Εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος 11, τότε η σχεδίαση έχει ολοκληρωθεί (οπότε ακολουθεί το βήμα 15), αλλιώς το επόμενο βήμα 13.
13. Βελτίωση συστήματος γείωσης με:
 - αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης,
 - πυκνωση του πλέγματος γείωσης,
 - προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων,
 - προσθήκη χώματος με χαμηλή ειδική αντίσταση ή βελτιωτικών εδάφους,
 - διασύνδεση του συστήματος γείωσης με άλλο σύστημα γείωσης,
 - αλλαγή προς το αυστηρότερο του κριτηρίου για τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Εφ'όσον εξασφαλίζεται από τα μέσα προστασίας ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερος, τότε τα όρια ασφαλείας για τη βηματική τάση και την τάση επαφής έχουν μεγαλύτερες τιμές,
 - χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας, συνήθως χαλκιού, στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης, εάν αυτό επιφέρει αλλαγή στα όρια ασφαλείας.
14. Επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας από το βήμα 4.
15. Κατασκευή του συστήματος γείωσης.
16. Μέτρηση της αντίστασης γείωσης.
17. Πραγματοποίηση τυχόν επιπλέον βελτιώσεων, όπου τούτο είναι τεχνικά αναγκαίο και εφικτό.

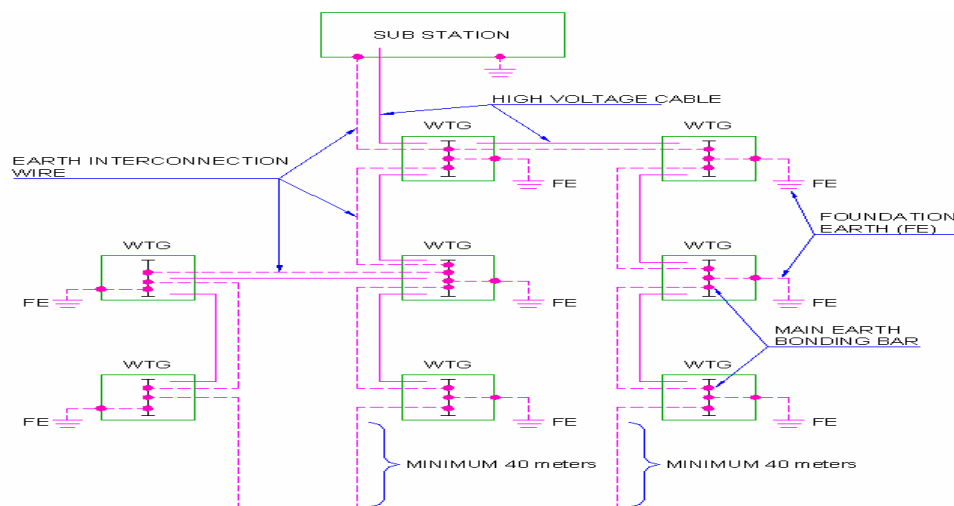
8.3 Κατασκευή συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

Η κατασκευή της γείωση μιας Α/Γ συνήθως πραγματοποιείται με την τοποθέτηση και συγκόλληση ενός δακτυλιοδοειδούς ηλεκτροδίου γείωσης γύρω από την θεμελίωση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Οι ράβδοι ενίσχυσης της θεμελίωσης ενώνονται απευθείας ή μέσω του πυλώνα με τον εσωτερικό δακτύλιο λειτουργώντας ως ηλεκτρόδιο γείωσης καθώς η αντίσταση του σκυρόδεματος μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους [28]. Συνήθως, όμως αυτοί αμελούνται παίρνοντας πιο συντηρητικές τιμές για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής). Συμπληρωματικά με το δακτυλίδι, χρησιμοποιούνται αγωγοί οριζόντιας και εγκάρσιας διεύθυνσης (ράβδοι) για τον περιορισμό της αντίστασης γείωσης σε χαμηλά επίπεδα τιμών (βλ. σχήμα 8.1). Σύμφωνα με διεθνή πρότυπα [29], [30] τιμή αντίστασης γείωσης μικρότερη ή ίση των 10Ω , θεωρείται αποδεκτή για αντικεραυνική προστασία, εξασφαλίζοντας συνήθως τήρηση των ορίων ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής).



Σχήμα 8.1 Τυπική διάταξη συστήματος γείωσης μεμονωμένης ανεμογεννήτριας

Τα επιμέρους συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών συνδέονται συνήθως μέσω της μεταλλικής θωράκισης του κεντρικού καλωδίου MT (βλ. σχήμα 8.2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής αντίστασης γείωσης του αιολικού πάρκου στην τιμή του 1 – 2 Ω. Στην περίπτωση όπου η θέση εγκατάστασης του Α/Π παρουσιάζει υψηλή τιμή αντίστασης εδάφους (> 2000 Ωm), που είναι και η συνήθης περίπτωση, τα ανεξάρτητα συστήματα γείωσης διασυνδέονται επιπροσθέτως με ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 8.2 Τυπική διάταξη διασύνδεσης αυτόνομων συστημάτων γείωσης Α/Γ [31]

Επιπλέον, πρέπει το κάθε σύστημα γείωσης να μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί, έτσι ώστε η αντίσταση γείωσης κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης να μετρείται κατά το στάδιο της κατασκευής. Στο στάδιο της κατασκευής, τα ανεξάρτητα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών χωρίζονται μεταξύ τους με φρεάτια, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος - μέτρηση του κάθε συστήματος γείωσης ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Μ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί, αφενός να αποδειχθεί η ακρίβεια των υπολογισμών της μελέτης, και αφετέρου να είναι δυνατή η, ενδεχομένως απαιτούμενη, ενίσχυση του συστήματος γείωσης.

8.4 Προσομοίωση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα επιμέρους στάδια προσομοίωσης του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου του Δ. Μολάων, υπό συνθήκες σφάλματος.

8.4.1 Καθορισμός Μέγιστης Αναμενόμενης Τιμής Ρεύματος Σφάλματος

Σύμφωνα με το Πρότυπο [15] και την μελέτη [32], ο χειρότερος τύπος και θέση σφάλματος σε μια ανεμογεννήτρια είναι το μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT, δίνοντας το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος I_{fLG} . Συγκεκριμένα, ο πίνακας 7.3 περιέχει το μέτρο I_f του ρεύματος σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT κάθε ανεμογεννήτριας, υπολογισμένο με τρεις διαφορετικούς τρόπους (IEC/ANSI/CFA), κάνοντας χρήση του λογισμικού πακέτου PSAF.

8.4.2 Μέτρηση Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους

Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, στις υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης των Α/Γ, πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την μέθοδο Wenner όπως περιγράφεται στο πρότυπο ANSI/IEEE Std 81-1983 καθώς και στην προδιαγραφή της ΔΕΗ [33]. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε δύο άξονες διεύθυνσης για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης με απόσταση διαδοχικών ηλεκτροδίων $a = \{2, 4, 8, 12, 16 \text{ m}\}$ αντίστοιχα. Το γειωσόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας MEGGER και ο τύπος του είναι DET4TCR2 με σειριακό αριθμό 000131479. Η συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας είναι της εταιρείας VELLEMAN τύπου ws8461 με την βοήθεια της οποίας, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, λήφθηκαν τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα για κάθε μία από τις θέσεις εγκατάστασης των Α/Γ καθώς και του Κτιρίου Ελέγχου. Ακολουθούν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης Α/Γ και Κέντρου Ελέγχου.

Ανεμογεννήτρια 1 (T = 19 °C / Hg=56%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	717,00	311,00	152,00	78,00	35,00
ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	9010,09	7816,28	7640,35	5881,06	3518,58
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	123,60	80,00	64,00	47,00	37,00
ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	1553,20	2010,62	3216,99	3543,72	3719,65
Ανεμογεννήτρια 2 (T = 21 °C / Hg=46%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	85,60	84,20	71,90	66,00	48,00
ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	1075,68	2116,18	3614,09	4976,28	4825,49
Άξονας 2					

α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	107,60	74,00	49,80	51,00	38,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	1352,14	1859,82	2503,22	3845,31	3820,18
Ανεμογεννήτρια 3 (T = 23 °C / Hg=44%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	55,00	71,40	67,10	47,00	45,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	691,15	1794,48	3372,81	3543,72	4523,89
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	69,00	75,00	59,80	79,00	42,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	867,08	1884,96	3005,88	5956,46	4222,30
Ανεμογεννήτρια 4 (T = 24 °C / Hg=43%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	422,00	251,00	88,30	41,00	34,70
ρ ($\Omega \cdot m$)	5303,01	6308,32	4438,44	3091,33	3488,42
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	332,00	277,00	64,00	49,00	24,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	4172,04	6961,77	3216,99	3694,51	2412,74
Ανεμογεννήτρια 5 (T = 26 °C / Hg=40%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	383,06	191,9	96,7	64,8	48,9
ρ ($\Omega \cdot m$)	4813,65	4822,78	4861,42	4888,92	4918,11
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	381,4	192,1	96,6	64,7	48,9
ρ ($\Omega \cdot m$)	4792,33	4826,96	4856,86	4880,12	4917,65
Ανεμογεννήτρια 6 (T = 28 °C / Hg=36%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	15,98	17,70	24,70	22,40	24,70
ρ ($\Omega \cdot m$)	200,81	444,85	1241,56	1688,92	2483,11
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	48,00	48,40	60,90	47,10	44,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	603,19	1216,42	3061,17	3551,26	4423,36
Ανεμογεννήτρια 7 (T = 24 °C / Hg=48%)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	117,10	130,40	84,70	70,00	90,00
ρ ($\Omega \cdot m$)	1471,52	3277,31	4257,49	5277,88	9047,79
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	42,00	44,00	56,00	48,20	42,80

ρ ($\Omega \cdot m$)	527,79	1105,84	2814,87	3634,19	4302,73
Ανεμογεννήτρια 8 ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Hg}=54\%$)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	420,1	210,3	105,6	70,9	53,4
ρ ($\Omega \cdot m$)	5279,44	5284,92	5310,01	5342,11	5365,78
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	419,7	210,0	105,5	70,6	53,2
ρ ($\Omega \cdot m$)	5274,72	5278,62	5300,59	5321,91	5346,3
Ανεμογεννήτρια 9 ($T = 29 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Hg}=35\%$)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	575,69	288,95	144,58	96,46	72,37
ρ ($\Omega \cdot m$)	7234,37	7262,09	7267,26	7273,17	7275,39
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	573,71	287,72	144,33	96,40	72,32
ρ ($\Omega \cdot m$)	7209,41	7231,19	7255,02	7268,43	7270,47
Κτίριο ελέγχου ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Hg}=35\%$)					
Άξονας 1					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	49,70	42,00	42,00	32,50	25,10
ρ ($\Omega \cdot m$)	586,85	1055,58	2111,15	2450,44	2523,33
Άξονας 2					
α (m)	2	4	8	12	16
R (Ω)	141,00	96,00	58,00	39,00	24,90
ρ ($\Omega \cdot m$)	1771,86	2412,74	2915,40	2940,53	2503,22

Πίνακας 8.1 Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους

8.4.3 Επιλογή Μοντέλου Προσέγγισης του Εδάφους

Λόγω των αποκλίσεων που παρατηρήθηκαν, θεωρήθηκε ως μετρηθείσα τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ , που αντιστοιχεί σε απόσταση ηλεκτροδίων α , η μέση τιμή των αντίστοιχων μετρήσεων της αντίστασης εδάφους για τους δύο άξονες.

Έδαφος	α (m)	2	4	8	12	16
ΑΓ 1	ρ ($\Omega \cdot m$)	5281,65	4913,45	5428,67	4712,39	3619,12
ΑΓ 2	ρ ($\Omega \cdot m$)	1213,91	1988	3058,66	4410,8	4322,84
ΑΓ 3	ρ ($\Omega \cdot m$)	831,89	1152,34	1910,09	3166,73	3619,12
ΑΓ 4	ρ ($\Omega \cdot m$)	402	830,64	2151,37	2620,09	3453,24
ΑΓ 5	ρ ($\Omega \cdot m$)	4802,99	4824,87	4859,14	4884,52	4917,88
ΑΓ 6	ρ ($\Omega \cdot m$)	1438,22	1950,3	4724,96	4738,78	5463,86
ΑΓ 7	ρ ($\Omega \cdot m$)	999,66	2191,58	3536,18	4456,04	6675,26
ΑΓ 8	ρ ($\Omega \cdot m$)	5277,08	5281,77	5305,3	5332,01	5356,04
ΑΓ 9	ρ ($\Omega \cdot m$)	7221,89	7246,64	7261,14	7270,8	7272,93
Κ/Ε	ρ ($\Omega \cdot m$)	1179,36	1734,16	2513,28	2695,49	5026,55

Πίνακας 8.2 Μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για τις υπογής θέσεις εγκατάστασης των Α/Γ και του Κτιρίου Ελέγχου

Κατά την διερεύνηση της πολυστρωματικής δομής του εδάφους, το κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου εδάφους είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των μετρούμενων τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αυτών που υπολογίζονται από το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης (RMS_{error}) :

$$\min_i (RMS_i) = RMS_j \Rightarrow opt \text{ soil model } : j$$

$$\text{,όπου } RMS(\%) = \sqrt{\frac{100 \times \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_m - \rho_c}{\rho_c} \right)_i^2}{N}}$$

ρ_m : μετρηθείσα τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους

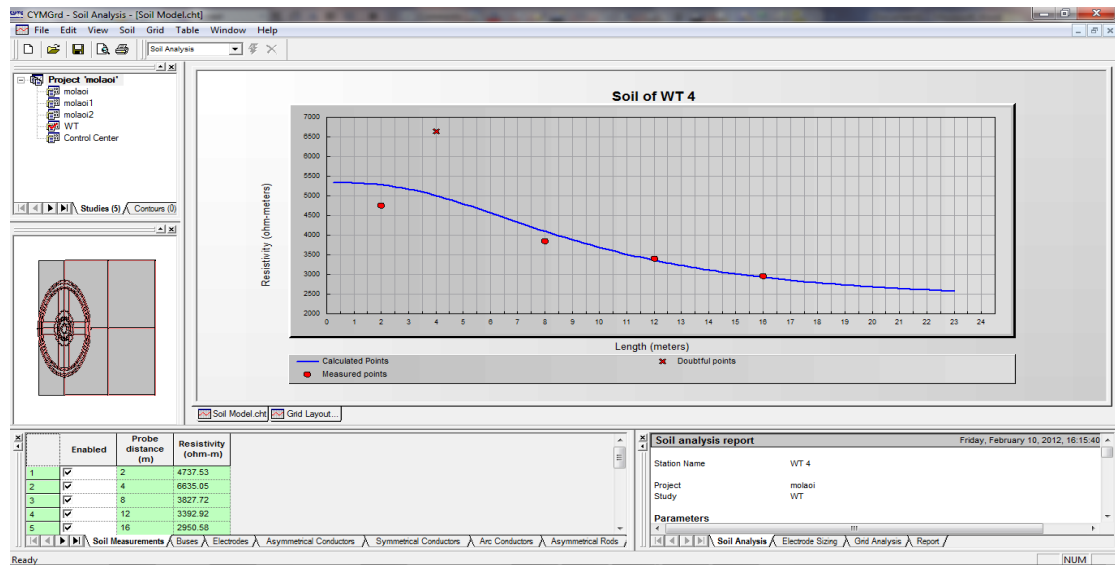
ρ_c : υπολογισθείσα τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους από μοντέλο προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό λοιπόν, των παραμέτρων του εδάφους (πλήθος,ειδική αντίσταση, πάχος στρωμάτων) εισάγονται οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους για κάθε υποψήφια θέση, στον επιλυτή Soil Model του προγράμματος CYMGrd. Τα αποτελέσματα της δομής του εδάφους για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

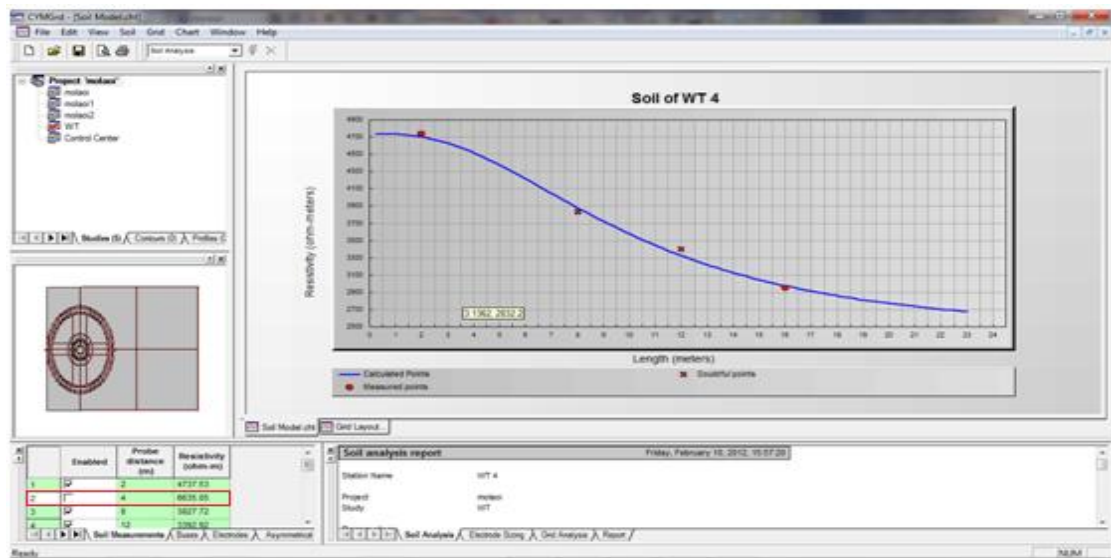
Έδαφος	Μοντέλο Εδάφους	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	RMS error (%)
A/Γ 1	Διστρωματικό	16,89	5281,03	0,26	5,68
A/Γ 2	Διστρωματικό	2	908,29	7207,08	5,37
A/Γ 3	Διστρωματικό	2	615,08	17177	14,00
A/Γ 4	Διστρωματικό	6,16	4737,51	2397,28	1,34
A/Γ 5	Μονοστρωματικό	100	4857,88	4857,88	----
A/Γ 6	Μονοστρωματικό	100	1891,47	1891,47	----
A/Γ 7	Διστρωματικό	2	730,55	24175,9	9,00
A/Γ 8	Μονοστρωματικό	100	5310,44	5310,44	----
A/Γ 9	Μονοστρωματικό	100	7254,68	7254,68	----
K/E	Διστρωματικό	4,52	1179,4	11290,1	14,50

Πίνακας 8.3 Προσεγγιστική δομή του εδάφους για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης με χρήση του προγράμματος CYMGrd

Σημειώνεται ότι για το έδαφος της A/Γ 4 αγνοήσαμε ως αβέβαιη την μέτρηση της ειδικής αντίστασης, που αντιστοιχεί σε απόσταση ηλεκτροδίων $a = 4$ m, μειώνοντας το RMS σφάλμα από 12,53% στο 1,34%,όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 8.3 Γραφική απεικόνιση της διστρωματικής προσέγγισης του εδάφους της Α/Γ 4 με πέντε (5) μετρήσεις αντίστασης εδάφους [RMS error = 12,53 %]

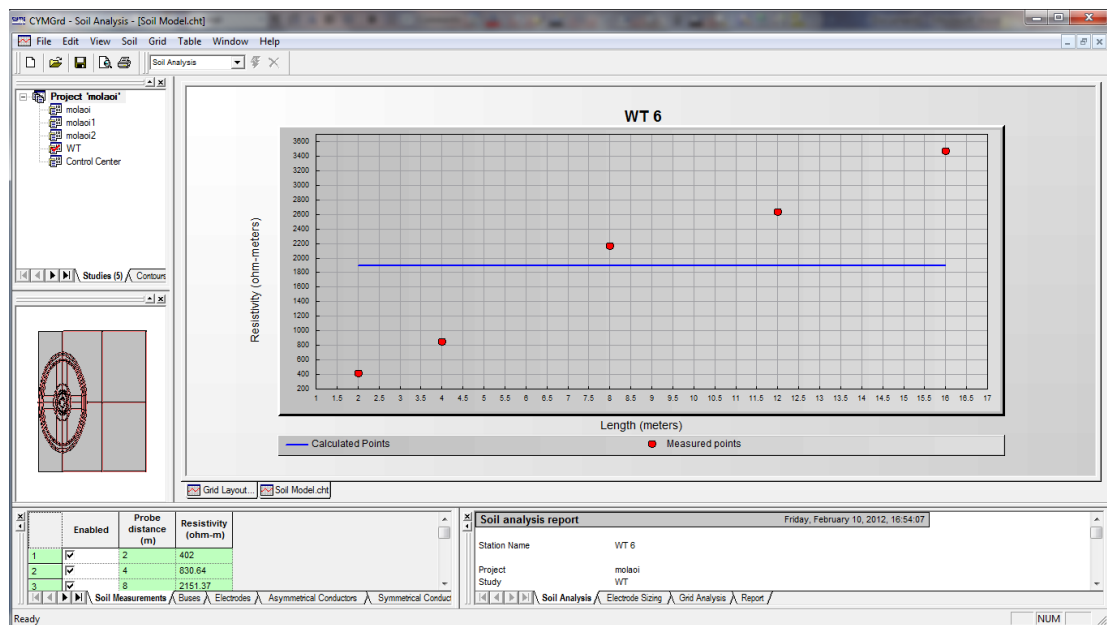


Σχήμα 8.4 Γραφική απεικόνιση της διστρωματικής προσέγγισης του εδάφους της Α/Γ 4 με τέσσερις (4) μετρήσεις αντίστασης εδάφους [RMS error = 1,34 %]

Το έδαφος της Α/Γ 6 προσεγγίζεται από μονοστρωματικό μοντέλο καθώς με βάση τις υπάρχουσες μετρηθείσες τιμές αντίστασης εδάφους το αντίστοιχο διστρωματικό μοντέλο, όπως αυτό προκύπτει από τον επιλυτή του CYMGrid, συνεπάγεται ανεπίτρεπτη τιμή ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος ($\rho_2 > 100000 \Omega\text{m}$).

Soil analysis report		Friday, February 10, 2012, 16:54:07
Station Name	WT 6	
Project	moleoi	
Study	WT	
Parameters		
Title	WT 6	
Soil Model	Uniform	
Safety Model	IEEE Std. 80-2000	
Body Weight	50 kg	
Surface Layer Thickness	0 meters	
Surface Layer Resistivity	2500 ohm-m	
Shock Duration	1 secs	
Output Results		
Upper Layer Thickness	100 meters	
Upper Layer Resistivity	1891.47 ohm-m	
Lower Layer Resistivity	1891.47 ohm-m	
Reduction Factor Cs	1	
Maximum Permissible Touch	169.48 volts	
Maximum Permissible Step	329.92 volts	

Εικόνα 8.1 Μονοστρωματική προσέγγιση του εδάφους τοποθέτησης της Α/Γ 6



Σχήμα 8.5 Γραφική απεικόνιση της μονοστρωματικής προσέγγισης του εδάφους της Α/Γ 6

8.4.4 Υπολογισμός Μέγιστων Επιτρεπόμενων Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής

Ο υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς βηματικής τάσης και τάσης επαφής γίνεται σύμφωνα με τα όσα προβλέπει το Πρότυπο [15]. Στον πίνακα που ακολουθεί περιέχονται τα όρια ασφαλείας των τάσεων (βηματικών και επαφής) για σωματικό βάρος 50 και 70 kg, χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0.5 και 1sec, χωρίς προσθήκη υλικού επιφανείας.

B=50kg	E_{step}^{max} (V)	E_{touch}^{max} (V)	E_{step}^{max} (V)	E_{touch}^{max} (V)	B=70kg	E_{step}^{max} (V)	E_{touch}^{max} (V)	E_{step}^{max} (V)	E_{touch}^{max} (V)
t_f	0.5 sec		1sec		t_f	0.5 sec		1sec	
Έδαφος					Έδαφος				
A/Γ 1	5326,72	1463,72	3792,01	1034,9	A/Γ 1	7258,16	1981,06	5132,3	1400,82
A/Γ 2	1058,07	387,55	748,17	274,04	A/Γ 2	1432,05	524,54	1012,61	370,9
A/Γ 3	769,47	315,4	544,1	223,02	A/Γ 3	1041,43	426,88	736,41	301,85
A/Γ 4	4827,14	1329,82	3413,31	940,33	A/Γ 4	6533,29	1799,85	4619,73	1272,68
A/Γ 5	4945,62	1359,44	3497,08	961,27	A/Γ 5	6693,65	1839,94	4733,12	1301,03
A/Γ 6	2025,81	629,49	1432,46	445,12	A/Γ 6	2741,83	851,98	1938,76	602,44
A/Γ 7	883,12	343,82	624,46	243,12	A/Γ 7	1195,26	465,34	845,18	329,04
A/Γ 8	5391,08	1470,81	3812,07	1040,02	A/Γ 8	7296,54	1990,66	5159,43	1407,61
A/Γ 9	7304,78	1949,23	5165,26	1378,31	A/Γ 9	1656,79	580,72	1171,52	410,63
K/E	1324,92	454,27	936,86	321,22	K/E	1793,22	614,83	1267,99	434,75

Πίνακας 8.4 Μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής για συνθήκες ασφάλειας $B = 50/70\text{kg}$, $t_f = 0.5/1\text{sec}$ χωρίς υλικό επιφανείας

8.4.5 Σχεδίαση Πλέγματος Γείωσης Ανεμογεννήτριας και Κτιρίου Ελέγχου

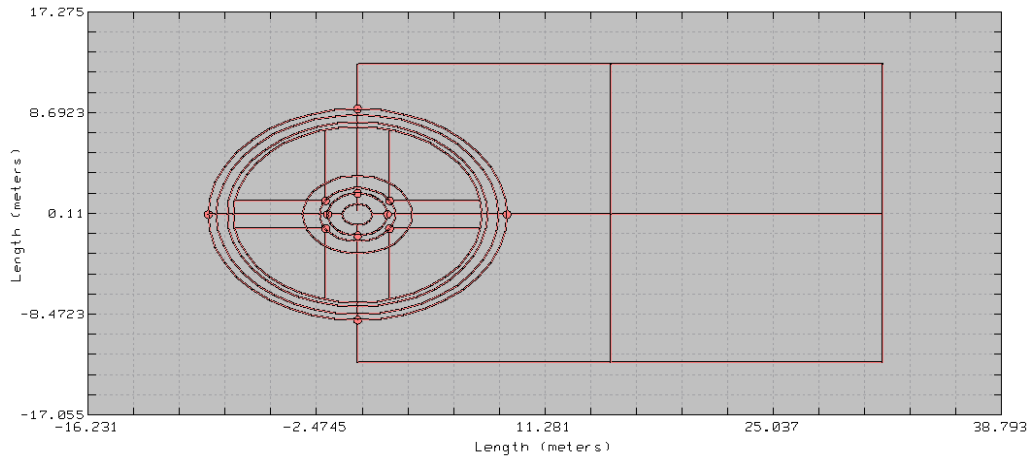
Βασικό μέλημα κατά την σχεδίαση ενός τυπικού πλέγματος γείωσης μιας ανεμογεννήτριας είναι η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της αντίστασης γείωσης αυτού, ώστε να εξασφαλιστεί η τήρηση των ορίων ασφαλείας από τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής). Για τις εννέα (9) Α/Γ στο Αιολικό Πάρκο του Δ.Μολάων αναπτύχθηκε πλέγμα γείωσης το οποίο αποτελείται από :

- Τρεις (3) δακτύλιους διαμέτρου 18, 17 και 15.6 m αντίστοιχα τοποθετημένους σε βάθος 3 m, από επικασσιτερωμένο χαλκό διατομής 150 mm²
- Δύο (2) δακτύλιους διαμέτρου 15 και 4.5m αντίστοιχα τοποθετημένους σε βάθος 2.5 m, από χαλκό διατομής 50 mm²
- Δακτύλιο διαμέτρου 6.6 m τοποθετημένο σε βάθος 1.2 m, από επικασσιτερωμένο χαλκό διατομής 150 mm²
- Δύο (2) δακτύλιους διαμέτρου 4.5 και 1.8 m αντίστοιχα τοποθετημένους σε βάθος 1 m, από χαλκό διατομής 100 mm²
- Τέσσερις (4) ράβδοι Φ14mm μήκους 2.8 m
- Τέσσερις (4) ράβδοι Φ14mm μήκους 1 m
- Ταινία γείωσης 40 × 4 mm² (γαλβανισμένος χαλκός) μέσα στο σκυρόδεμα

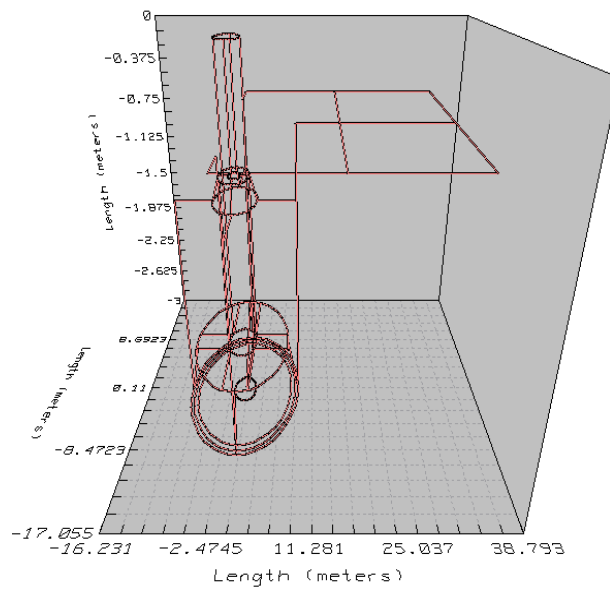
Το μήκος του πλέγματος γείωσης είναι 32 m και το πλάτος αυτού 25 m με βάθος τοποθέτησης τα 0.6 m. Στο σχήμα 8.6 φαίνονται οι λεπτομέρειες και οι εσωτερικές συνδέσεις για το τυπικό πλέγμα γείωσης μιας ανεμογεννήτριας.

Το πλέγμα γείωσης που επιλέχθηκε για το Κτίριο Ελέγχου έχει διαστάσεις 10 m × 4 m ενώ περιμετρικός αγωγός βρίσκεται σε απόσταση 2 m από το υπόλοιπο πλέγμα, το οποίο τοποθετείται σε βάθος 1m. Στο σχήμα 8.7 φαίνεται η κάτοψη του πλέγματος του Κτιρίου Ελέγχου.

α)

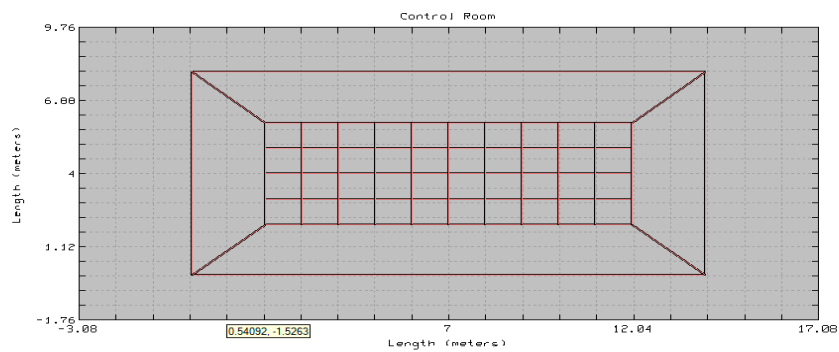


β)



Σχήμα 8.6 α) Κάτοψη πλέγματος γείωσης ανεμογεννήτριας

β) Τρισδιάστατη απεικόνιση του πλέγματος γείωσης ανεμογεννήτριας



Σχήμα 8.7 Κάτοψη του πλέγματος γείωσης για το Κτίριο Ελέγχου

8.4.6 Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης

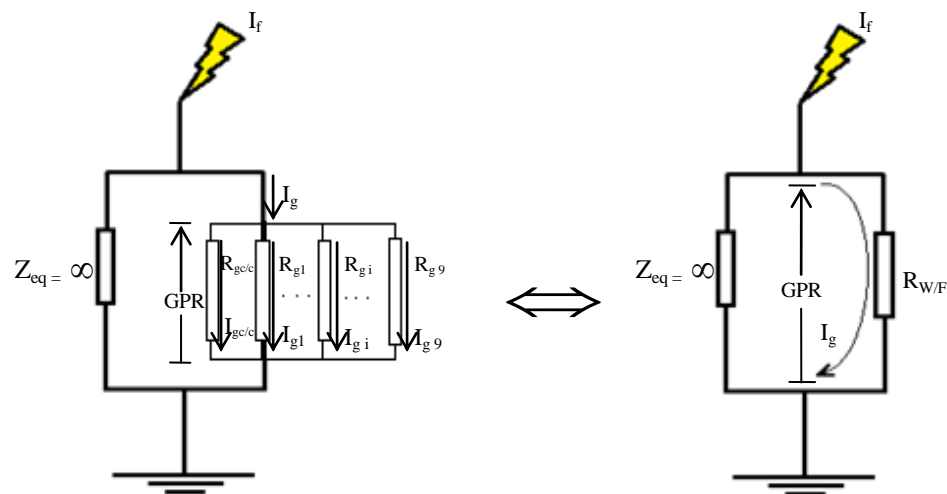
Οι αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών συστημάτων γείωσης είναι σχετικά μικρές γεγονός που επιτρέπει να αμελήσουμε την σύνθετη αντίσταση των αγωγών διασύνδεσης. Με βάση αυτή την παραδοχή η συνολική αντίσταση γείωσης που παρουσιάζει το αιολικό πάρκο μπορεί να θεωρηθεί ίση με την παράλληλη σύνθεση των επιμέρους αντιστάσεων γείωσης των ανεμογεννητριών και του κτιρίου ελέγχου. Για το αιολικό πάρκο του Δ.Μολάων υπολογίστηκε, με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις αντίστασης εδάφους, η αντίσταση γείωσης στις τοποθεσίες των εννέα (9) ανεμογεννητριών και του κτιρίου ελέγχου με χρήση του επιλυτή Grid Analysis του λογισμικού CYMGrd και παρατίθενται στον πίνακα 8.5 .

Η δυσμενέστερη περίπτωση από άποψη ανύψωσης δυναμικού γης (GPR) και κατεπέκταση αναπτυσσόμενων τάσεων (E_{touch} , E_{step}) είναι όταν το ρεύμα σφάλματος, ανεξάρτητα από το σημείο εγχύσεως αυτού, ρέει προς γη χωρίς να επιστρέφει μέσω αγωγών επιστροφής και εναέριων γραμμών. Οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τον καταμερισμό του ρεύματος σφάλματος στην περίπτωση αυτή είναι :

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} , Z_{eq} = \infty$$

$$\lim_{Z_{eq} \rightarrow \infty} S_f = 1 \Rightarrow I_g = I_f$$

Αμελώντας λοιπόν, τις διασυνδέσεις των επιμέρους συστημάτων γείωσης και θεωρώντας $Z_{eq} = \infty$, προκύπτει ότι το ρεύμα σφάλματος I_f ‘βλέπει’ την ισοδύναμη αντίσταση γείωσης του αιολικού πάρκου $R_{W/F}$, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 8.8 .



Σχήμα 8.8 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα αναπαράστασης του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης του Α/Π, για $Z_{eq} = \infty$ και $R_{W/F} = (R_{g/1} // \dots // R_{g/9} // R_{g/c/c})$

Το ρεύμα σφάλματος I_f διαμοιράζεται στα επιμέρους συστήματα γείωσης αντιστρόφως ανάλογα της αντίστασης των, λόγω της παράλληλης συνδεσμολογίας και του υποκαταμεριστή ρεύματος (S_{f_i}) που αυτή συνεπάγεται. Το ρεύμα πλέγματος I_{g_i} , που διοχετεύεται μέσω του $i^{\text{ου}}$ συστήματος γείωσης στο έδαφος, δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{g_i} = S_{f_i} I_f \quad (8.4.6.1)$$

$$S_{f_i} = \frac{Z_{eq_i}}{Z_{eq_i} + R_{g_i}}, \quad Z_{eq_i} = \frac{1}{\sum_{j \neq i}^N \frac{1}{R_{g_j}} + \frac{1}{R_{g_c/c}}}$$

δίνοντας ίδια ανύψωση δυναμικού γης σε κάθε τοποθεσία εγκατάστασης και ίση με :

$$GPR = I_{G_i} R_{g_i} = D_f I_{g_i} R_{g_i} \quad \forall i, \text{ όπου } I_{g_i} = S_{f_i} I_f \quad (8.4.6.2)$$

ή

$$GPR = I_G R_{W/F} = D_f I_g R_{W/F}, \text{ όπου } I_g = S_f I_f \Big|_{S_f=1} = I_f$$

Στον πίνακα 8.5 που ακολουθεί περιέχονται οι αντιστάσεις γείωσης των Α/Γ και του Κτιρίου Ελέγχου καθώς και οι συντελεστές καταμερισμού S_{f_i} του ρεύματος σφάλματος με τις ισοδύναμες παράλληλες αντιστάσεις Z_{eq_i} , που αντιστοιχούν σε κάθε επιμέρους σύστημα γείωσης.

Έδαφος	R_{g_i} (Ω)	Z_{eq_i} (Ω)	S_{f_i}
Α/Γ 1	50,6	7,17	0,124
Α/Γ 2	59,2	7,02	0,106
Α/Γ 3	79,2	6,82	0,079
Α/Γ 4	51,2	7,16	0,123
Α/Γ 5	72,4	6,88	0,087
Α/Γ 6	28,2	8,08	0,223
Α/Γ 7	101,5	6,69	0,062
Α/Γ 8	79,2	6,82	0,079
Α/Γ 9	108,2	6,67	0,058
Κ/Ε	105,6	6,68	0,059

Πίνακας 8.5 Αντίσταση γείωσης και συντελεστές καταμερισμού ρεύματος σφάλματος στα επιμέρους συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου του Δ. Μολάων

8.4.7 Αναλυτικός Υπολογισμός Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής

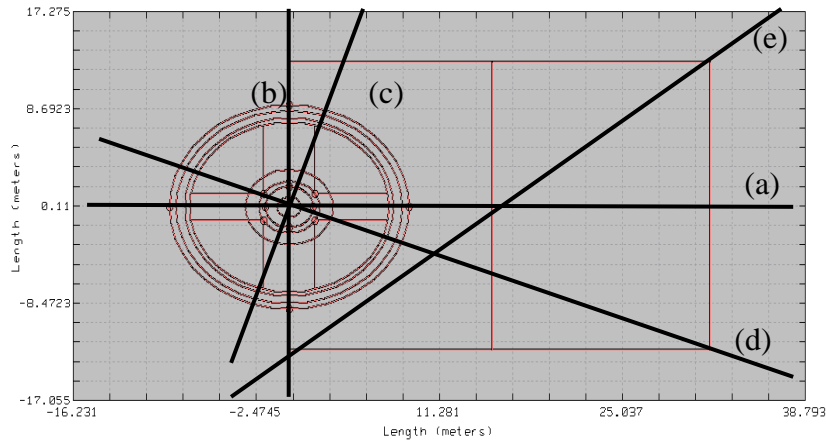
Η δυσμενέστερη περίπτωση, από άποψη μέγιστων αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, είναι αυτή για την οποία παρατηρείται το υψηλότερο μονοφασικό ρεύμα σφάλματος στην πλευρά ΜΤ . Με βάση τον πίνακα 7.3 εύκολα παρατηρούμε ότι η περίπτωση αυτή είναι για μονοφασικό σφάλμα προς γη στη πλευρά ΜΤ (20kV) της Α/Γ 1, δίνοντας το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος $I_{kl\max}''$. Προσομοιώθηκε λοιπόν, με χρήση του προγράμματος CYMGrd, η απόκριση χαμηλής συχνότητας (50Hz) του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ 1 και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA).

Για την προσομοίωση της απόκρισης του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης χρησιμοποιήθηκε η ισοδύναμη θεώρηση μεμονομένων συστημάτων γείωσης τα οποία διαρρέονται από τα αντίστοιχα ρεύματα πλέγματος του διασυνδεδεμένου συστήματος. Στον πίνακα που ακολουθεί έχει υπολογιστεί το ρεύμα πλέγματος I_g κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ 1.

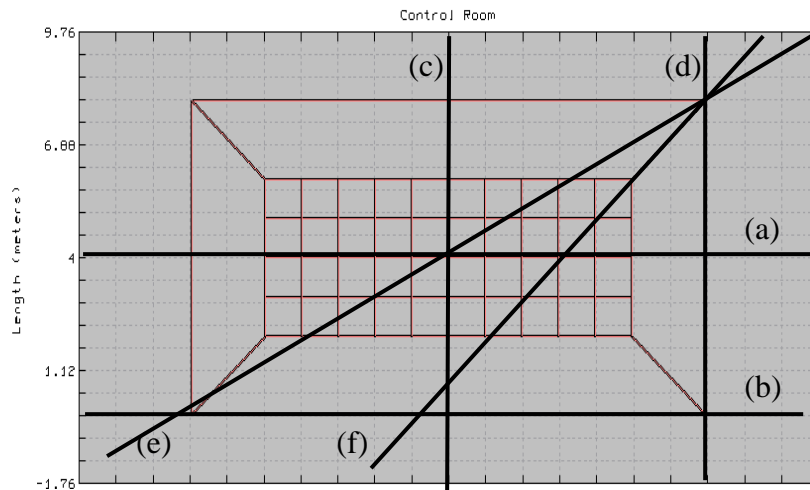
	1Φ-γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA
	I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576
Τύπος Υ/Σ	S_{fi}	I_{gi} (A)	I_{gi} (A)	I_{gi} (A)
Α/Γ 1	0,124	103,33	88,20	93,94
Α/Γ 2	0,106	88,33	75,40	80,31
Α/Γ 3	0,079	65,83	56,19	59,85
Α/Γ 4	0,123	102,50	87,49	93,18
Α/Γ 5	0,087	72,50	61,88	65,91
Α/Γ 6	0,223	185,83	158,62	168,94
Α/Γ7	0,062	51,66	44,10	46,97
Α/Γ 8	0,079	65,83	56,19	59,85
Α/Γ 9	0,058	48,33	41,26	43,94
Κ/Ε	0,059	49,17	41,97	44,70

Πίνακας 8.6 Ρεύμα Πλέγματος (I_g) σε κάθε ανεξάρτητο σύστημα γείωσης για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1, σύμφωνα με IEC/ANSI/CFA

Ο υπολογισμός του επιφανειακού δυναμικού και των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) επικεντρώθηκε κατά μήκος της διεύθυνσεως πέντε (5) αξόνων στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης των Α/Γ και έξι (6) για το Κέντρο Ελέγχου.



Σχήμα 8.9 Άξονες στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης των Α/Γ κατά μήκος της διεύθυνσης των οποίων υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις



Σχήμα 8.10 Άξονες στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης του Κ/Ε κατά μήκος της διεύθυνσης των οποίων υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις

8.5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων - Σχολιασμός

8.5.1 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) του αιολικού πάρκου

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματική τάση και τάση επαφής), κατά μήκος των επιλεγθέντων αξόνων, στις τοποθεσίες εγκατάστασης των Α/Γ και του Κ/Ε του αιολικού πάρκου. Ενδεικτικά, παραθέτουμε τα αποτελέσματα της απόκρισης του συστήματος γείωσης της Α/Γ 2 για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ 1 και για τους τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος, κάνοντας χρήση του επιλυτή Grid Analysis του CYMGrd.

Grid analysis report		Wednesday, February 29, 2012, 12:39:58		
Station Name	WT 2			
Project	molaio			
Study	WT			
Parameters				
Equivalent Parallel Z Spec.	User Defined			
Split Factor	0.106026	S_{f2}		
Nominal Frequency	50 hz			
Bus ID	20 KV			
LG Fault Current	833.3 amps			
Remote Contribution	100 %			
Upper Layer Thickness	2 meters			
Upper Layer Resistivity	908.29 ohm-m			
Lower Layer Resistivity	7207.08 ohm-m			
Output Results				
Parallel Z	Z_{eq2}	7.02337 ohms	Ground Potential Rise	5234.55 volts
Decrement Factor	1.00048		Calculated Ground Resistance	59.2186 ohms
			Equivalent Impedance	6.27871 ohms R_{wf}

Εικόνα 8.2 Αποτελέσματα απόκρισης του συστήματος γείωσης της Α/Γ2 για μονοφασικό σφάλμα στην Α/Γ 1 σύμφωνα με το Πρότυπο IEC ($I_f = 833.3 \text{ A}$)

Grid analysis report		Wednesday, February 29, 2012, 13:00:36	
Station Name	WT 2		
Project	molaio		
Study	WT		
Parameters			
Equivalent Parallel Z Spec.	User Defined		
Split Factor	0.106026		
Nominal Frequency	50 hz		
Bus ID	20 KV		
LG Fault Current	711.3 amps		
Remote Contribution	100 %		
Upper Layer Thickness	2 meters		
Upper Layer Resistivity	908.29 ohm-m		
Lower Layer Resistivity	7207.08 ohm-m		
Output Results			
Parallel Z	7.02337 ohms	Ground Potential Rise	4468.18 volts
Decrement Factor	1.00048	Calculated Ground Resistance	59.2186 ohms
		Equivalent Impedance	6.27871 ohms

Εικόνα 8.3 Αποτελέσματα απόκρισης του συστήματος γείωσης της Α/Γ2 για μονοφασικό σφάλμα στην Α/Γ 1 σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI ($I_f = 711.3 \text{ A}$)

Grid analysis report		Wednesday, February 29, 2012, 13:04:56	
Station Name	WT 2		
Project	molaioi		
Study	WT		
Parameters			
Equivalent Parallel Z Spec.	User Defined		
Split Factor	0.106026		
Nominal Frequency	50 hz		
Bus ID	20 kV		
LG Fault Current	757.6 amps		
Remote Contribution	100 %		
Upper Layer Thickness	2 meters		
Upper Layer Resistivity	908.29 ohm-m		
Lower Layer Resistivity	7207.08 ohm-m		
Output Results			
Parallel Z	7.02337 ohms	Ground Potential Rise	4759.02 volts
Decrement Factor	1.00048	Calculated Ground Resistance	59.2186 ohms
		Equivalent Impedance	6.27871 ohms

Εικόνα 8.4 Αποτελέσματα απόκρισης του συστήματος γείωσης της A/G2 για μονοφασικό σφάλμα στην A/G 1 σύμφωνα με την μέθοδο CFA ($I_f = 757.6$ A)

Για την συγκριτική αντιπαράθεση των τιμών του ρεύματος σφάλματος (I_f), του ρεύματος πλέγματος (I_g) και της ανύψωσης δυναμικού γης (GPR), που προκύπτουν με βάση τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους, υπολογίζονται οι σχετικές αποκλίσεις αυτών, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

	IEC	ANSI	CFA		IEC/ ANSI	CFA/ ANSI
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	$\Delta I_f / I_f$ (%)	17,15	6,51
I_g (A)	88,33	75,4	80,31	$\Delta I_g / I_g$ (%)	17,15	6,51
GPR(V)	5234,55	4468,18	4759,02	$\Delta GPR / GPR$ (%)	17,15	6,51

Πίνακας 8.6 Σχετικές αποκλίσεις ρεύματος σφάλματος (I_f) A/G1, ρεύματος πλέγματος (I_g) A/G 2 και ανύψωσης δυναμικού γης (GPR) A/G 2

Από τον πίνακα 8.6 παρατηρούμε ότι η % απόκλιση του ρεύματος σφάλματος ΔI_f , εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού αυτού, οδηγεί σε ισόποση % απόκλιση του ρεύματος πλέγματος της A/G2, ΔI_g , και κατεπέκταση της ανύψωσης δυναμικού γης αυτής, ΔGPR . Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι και ο επιμερισμός του ρεύματος σφάλματος στα επιμέρους συστήματα γείωσης και η ανύψωση δυναμικού γης παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, το ρεύμα πλέγματος της i A/G (I_{g_i}) είναι ευθέως ανάλογο του ρεύματος σφάλματος (I_f), όπως προκύπτει από την σχέση (8.4.6.1) : $I_{g_i} = S_{f_i} I_f$. Όμοια και η ανύψωση δυναμικού γης της i A/G (GPR) είναι ανάλογη του ρεύματος σφάλματος (I_f), όπως φαίνεται από την σχέση (8.4.6.2) : $GPR = (D_f S_{f_i} R_{g_i}) I_f \forall i$. Επειδή, οι σχέσεις

(8.4.6.1) και (8.4.6.2) ισχύουν για κάθε σύστημα γείωσης του αιολικού πάρκου, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι οι μεταξύ των αποστάσεις είναι ικανές (μικρές) ώστε να αμελείται η σύνθετη αντίσταση των αντίστοιχων διασυνδέσεων, τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να γενικευτούν για όλα τα επιμέρους ανεξάρτητα συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου.

Η % απόκλιση υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος οδηγεί σε ισόποση % απόκλιση του ρεύματος πλέγματος και ανύψωσης δυναμικού γης του εκάστοτε συστήματος γείωσης ($\Delta I_f (\%) = \Delta I_{g_i} (\%) = \Delta GPR (\%)$). Είναι φυσικό όμως η απόκλιση του ρεύματος σφάλματος, λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού αυτού, να μεταφέρεται στον υπολογισμό των επιφανειακών κλίσεων δυναμικού καθώς και των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής), με τις τελευταίες να αποτελούν κρίσιμα μεγέθη για την ασφάλεια που παρέχεται από το σύστημα γείωσης. Για τον λόγο αυτό υπολογίστηκαν, με χρήση του επιλυτή Profile Plot του CYMGrd, το επιφανειακό δυναμικό, οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής κατά μήκος των επιλεγθέντων αξόνων (βλ. σχήμα 8.9 και 8.10) σε κάθε σύστημα γείωσης του αιολικού πάρκου, με τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA). Ενδεικτικά, παραθέτουμε τα αποτελέσματα της απόκρισης του συστήματος γείωσης της A/Γ2 κατά μήκος του άξονα (a), για μονοφασικό σφάλμα στην A/Γ1 :

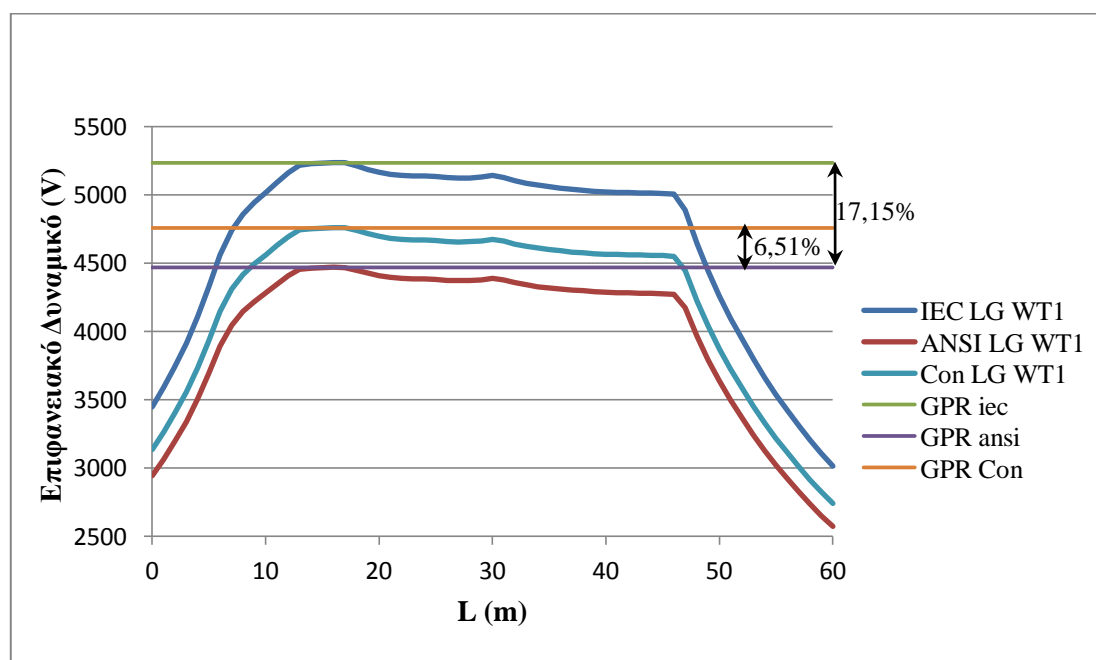
Μονοφασικό Σφάλμα στην πλευρά ΜΤ(20kV) της Α/Γ1																
	IEC	ANSI	CFA		IEC/ ANSI	CFA/ ANSI										
I _f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	ΔI _f (%)	17,15	6,51										
I _g (A)	88,33	75,4	80,31	ΔI _g (%)	17,15	6,51										
GPR(V)	5234,55	4468,18	4759,02	ΔGPR(%)	17,15	6,51										
	IEC			ANSI			CFA			IEC/ANSI			CFA/ANSI			
L(m)	SP(V)	Estep(V)	Etouch(V)	SP(V)	Estep(V)	Etouch(V)	SP(V)	Estep(V)	Etouch(V)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)	ΔE _{touch} (%)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)	ΔE _{touch} (%)	
0,00	3447,51	138,63	1787,04	2942,74	118,33	1525,44	3134,32	126,03	1624,70	17,15	17,16		6,51	6,51		
1,00	3586,14	153,10	1648,41	3061,07	130,69	1407,11	3260,35	139,20	1498,67	17,15	17,15		6,51	6,51		
2,00	3739,24	171,19	1495,31	3191,76	146,12	1276,42	3399,55	155,63	1359,47	17,15	17,16		6,51	6,51		
3,00	3910,43	195,29	1324,12	3337,88	166,70	1130,30	3555,18	177,55	1203,84	17,15	17,15		6,51	6,51		
4,00	4105,72	220,25	1128,83	3504,58	187,99	963,60	3732,73	200,24	1026,29	17,15	17,16		6,51	6,52		
5,00	4325,97	232,40	908,58	3692,57	198,38	775,61	3932,97	211,28	826,05	17,15	17,15		6,51	6,50		
6,00	4558,37	180,43	676,18	3890,95	154,01	577,23	4144,25	164,03	614,77	17,15	17,15		6,51	6,51		
7,00	4738,80	117,41	495,75	4044,96	100,22	423,22	4308,28	106,75	450,74	17,15	17,15		6,51	6,52		
8,00	4856,21	85,27	378,34	4145,18	72,79	323,00	4415,03	77,53	343,99	17,15	17,15		6,51	6,51		
9,00	4941,48	75,14	293,07	4217,97	64,15	250,21	4492,56	68,33	266,46	17,15	17,13		6,51	6,52		
10,00	5016,62	75,50	217,93	4282,12	64,44	186,06	4560,89	68,65	198,13	17,15	17,16	17,13	6,51	6,53	6,49	
11,00	5092,12	69,56	142,43	4346,56	59,37	121,62	4629,54	63,25	129,48	17,15	17,16	17,11	6,51	6,54	6,47	
12,00	5161,68	54,84	72,87	4405,93	46,80	62,25	4692,79	49,86	66,23	17,15	17,18	17,06	6,51	6,54	6,40	
13,00	5216,52	11,22	18,03	4452,73	9,57	15,45	4742,65	10,20	16,37	17,15	17,24	16,69	6,51	6,58	5,97	
14,00	5227,74	4,56	6,81	4462,30	3,88	5,88	4752,85	4,14	6,17	17,15	Πυλώνας Α/Γ	Πυλώνας Α/Γ	6,51	Πυλώνας Α/Γ	Πυλώνας Α/Γ	
15,00	5232,30	2,25	2,25	4466,18	2,00	2,00	4756,99	2,03	2,03	17,15			6,51			
16,00	5234,55	0,91	0,00	4468,18	0,88	0,00	4759,02	0,81	0,00	17,15	D=3,6 m	D=3,6 m	6,51	D=3,6 m	D=3,6 m	
17,00	5233,64	21,98	0,91	4467,30	18,74	0,88	4758,21	19,98	0,81	17,15	17,29	3,20	6,51	6,62	-7,64	
18,00	5211,66	25,34	22,89	4448,56	21,63	19,62	4738,23	23,04	20,79	17,15	17,15	16,66	6,51	6,52	5,98	
19,00	5186,32	22,04	48,23	4426,93	18,81	41,25	4715,19	20,05	43,83	17,15	17,17	16,92	6,51	6,59	6,26	
20,00	5164,28	15,48	70,27	4408,12	13,21	60,06	4695,14	14,07	63,88	17,15	17,18	17,00	6,51	6,51	6,37	

L(m)	IEC			ANSI			CFA			IEC/ANSI			CFA/ANSI		
	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)	ΔE _{touch} (%)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)	ΔE _{touch} (%)
21,00	5148,80	8,02	85,75	4394,91	6,85	73,27	4681,07	7,29	77,95	17,15	17,08		6,51	6,42	
22,00	5140,78	4,29	93,77	4388,06	3,66	80,12	4673,78	3,90	85,24	17,15	17,21		6,51	6,56	
23,00	5136,49	1,20	98,06	4384,40	1,03	83,78	4669,88	1,09	89,14	17,15	16,50		6,51	5,83	
24,00	5137,69	5,45	96,86	4385,43	4,63	82,75	4670,97	4,96	88,05	17,15	17,71		6,51	7,13	
25,00	5132,24	7,58	102,31	4380,80	6,46	87,38	4666,01	6,89	93,01	17,15	17,34		6,51	6,66	
26,00	5124,66	4,13	109,89	4374,34	3,52	93,84	4659,12	3,75	99,90	17,15	17,33		6,51	6,53	
27,00	5120,53	1,36	114,02	4370,82	1,17	97,36	4655,37	1,24	103,65	17,15	16,24		6,51	5,98	
28,00	5121,89	6,57	112,66	4371,99	5,61	96,19	4656,61	5,98	102,41	17,15	17,11		6,51	6,60	
29,00	5128,46	13,05	106,09	4377,60	11,14	90,58	4662,59	11,84	96,43	17,15	17,15		6,51	6,28	
30,00	5141,51	14,87	93,04	4388,74	12,69	79,44	4674,43	13,52	84,59	17,15	17,18		6,51	6,54	
31,00	5126,64	23,67	107,91	4376,05	20,20	92,13	4660,91	21,51	98,11	17,15	17,18		6,51	6,49	
32,00	5102,97	18,37	131,58	4355,85	15,68	112,33	4639,40	16,70	119,62	17,15	17,16		6,51	6,51	
33,00	5084,60	14,82	149,95	4340,17	12,65	128,01	4622,70	13,48	136,32	17,15	17,15		6,51	6,56	
34,00	5069,78	11,28	164,77	4327,52	9,62	140,66	4609,22	10,25	149,80	17,15	17,26		6,51	6,55	
35,00	5058,50	10,48	176,05	4317,90	8,96	150,28	4598,97	9,54	160,05	17,15	16,96		6,51	6,47	
36,00	5048,02	9,02	186,53	4308,94	7,70	159,24	4589,43	8,20	169,59	17,15	17,14		6,51	6,49	
37,00	5039,00	5,57	195,55	4301,24	4,76	166,94	4581,23	5,06	177,79	17,15	17,02		6,51	6,30	
38,00	5033,43	7,55	201,12	4296,48	6,43	171,70	4576,17	6,86	182,85	17,15	17,42		6,51	6,69	
39,00	5025,88	4,82	208,67	4290,05	4,12	178,13	4569,31	4,39	189,71	17,15	16,99		6,51	6,55	
40,00	5021,06	2,34	213,49	4285,93	2,00	182,25	4564,92	2,14	194,10	17,15	17,00		6,51	7,00	
41,00	5018,72	2,12	215,83	4283,93	1,80	184,25	4562,78	1,93	196,24	17,15	17,78		6,51	7,22	
42,00	5016,60	2,48	217,95	4282,13	2,12	186,05	4560,85	2,24	198,17	17,15	16,98		6,51	5,66	
43,00	5014,12	1,46	220,43	4280,01	1,26	188,17	4558,61	1,33	200,41	17,15	15,87		6,51	5,56	
44,00	5012,66	3,45	221,89	4278,75	2,94	189,43	4557,28	3,12	201,74	17,15	17,35		6,51	6,12	
45,00	5009,21	5,98	225,34	4275,81	5,10	192,37	4554,16	5,43	204,86	17,15	17,25		6,51	6,47	
46,00	5003,23	114,17	231,32	4270,71	97,46	197,47	4548,73	103,81	210,29	17,15	17,15		6,51	6,52	
47,00	4889,06	242,98	345,49	4173,25	207,41	294,93	4444,92	220,91	314,10	17,15	17,15		6,51	6,51	
48,00	4646,08	203,43	588,47	3965,84	173,64	502,34	4224,01	184,95	535,01	17,15	17,16		6,51	6,51	

L(m)	IEC			ANSI			CFA			IEC/ANSI		CFA/ANSI	
	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	SP(V)	E _{step} (V)	E _{touch} (V)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)	ΔSP (%)	ΔE _{step} (%)
49,00	4442,65	181,56	791,90	3792,20	154,98	675,98	4039,06	165,07	719,96	17,15	17,15	6,51	6,51
50,00	4261,09	165,25	973,46	3637,22	141,05	830,96	3873,99	150,24	885,03	17,15	17,16	6,51	6,52
51,00	4095,84	154,28	1138,71	3496,17	131,69	972,01	3723,75	140,26	1035,27	17,15	17,15	6,51	6,51
52,00	3941,56	144,37	1292,99	3364,48	123,23	1103,70	3583,49	131,25	1175,53	17,15	17,15	6,51	6,51
53,00	3797,19	134,54	1437,36	3241,25	114,85	1226,93	3452,24	122,33	1306,78	17,15	17,14	6,51	6,51
54,00	3662,65	125,02	1571,90	3126,40	106,71	1341,78	3329,91	113,66	1429,11	17,15	17,16	6,51	6,51
55,00	3537,63	117,24	1696,92	3019,69	100,07	1448,49	3216,25	106,58	1542,77	17,15	17,16	6,51	6,51
56,00	3420,39	111,21	1814,16	2919,62	94,94	1548,56	3109,67	101,12	1649,35	17,15	17,14	6,51	6,51
57,00	3309,18	104,61	1925,37	2824,68	89,29	1643,50	3008,55	95,10	1750,47	17,15	17,16	6,51	6,51
58,00	3204,57	98,29	2029,98	2735,39	83,90	1732,79	2913,45	89,37	1845,57	17,15	17,15	6,51	6,52
59,00	3106,28	92,62	2128,27	2651,49	79,06	1816,69	2824,08	84,20	1934,94	17,15	17,15	6,51	6,50
60,00	3013,66		2220,89	2572,43		1895,75	2739,88		2019,14	17,15		6,51	

Πίνακας 8.7 Τιμές και σχετικές ποσοστιαίες αποκλίσεις του επιφανειακού δυναμικού (SP), των βηματικών τάσεων (E_{step}) και των τάσεων επαφής (E_{touch}) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2 σύμφωνα με τις μεθόδους IEC, ANSI και CFA για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1

Από τον πίνακα 8.7 παρατηρούμε ότι η % απόκλιση του ρεύματος σφάλματος οδηγεί σε σχεδόν ίδια % απόκλιση τόσο του επιφανειακού δυναμικού όσο και των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2. Αυτό παρατηρήθηκε σε όλα τα συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου (Α/Γ και Κ/Ε) και σε κάθε άξονα. Δηλαδή σε κάθε σύστημα γείωσης και για κάθε άξονα διεύθυνσης παρατηρήθηκε ότι : $\Delta I_f (\%) = \Delta I_{g_i} (\%) = \Delta GPR (\%) = \Delta SP (\%) = \Delta E_{step} (\%) = \Delta E_{touch} (\%)$, γεγονός που αναδεικνύει την γραμμική συμπεριφορά της μοντελοποίησης και αναλυτικής επίλυσης του φαινομένου διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στην γη, αμελώντας βέβαια τον ιονισμό του εδάφους. Ακολουθούν τα διαγράμματα του επιφανειακού δυναμικού και των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2, σύμφωνα με τις μεθόδους IEC/ANSI/CFA .



Σχήμα 8.11 Κατανομή του επιφανειακού δυναμικού της Α/Γ 2 κατά μήκος του άξονα (a)

Από το σχήμα 8.11 παρατηρούμε ότι το προφίλ του επιφανειακού δυναμικού κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2 διατηρεί την μορφή του και για τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος, με αυτό που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές επιφανειακού δυναμικού να αντιστοιχεί στο Πρότυπο IEC. Συγκεκριμένα, η απόκλιση του επιφανειακού δυναμικού, ΔSP , μεταξύ IEC / ANSI είναι 17,15% ενώ η αντίστοιχη μεταξύ CFA / ANSI στο 6.51%.

Αναφορικά με την βηματική τάση E_{step} , η οποία ορίζεται σύμφωνα με το Πρότυπο [15] ως η διαφορά του επιφανειακού δυναμικού μεταξύ των ποδών ενός ανθρώπου για άνοιγμα βήματος ίσο με 1m, και δεδομένου της % απόκλισης του επιφανειακού δυναμικού κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2 για τις τρεις μεθόδους υπολογισμού

του ρεύματος σφάλματος ($\Delta SP^{IEC/ANSI} = 17,15\%$ και $\Delta SP^{CFA/ANSI} = 6,51\%$), η % απόκλιση των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ2 είναι ίση με :

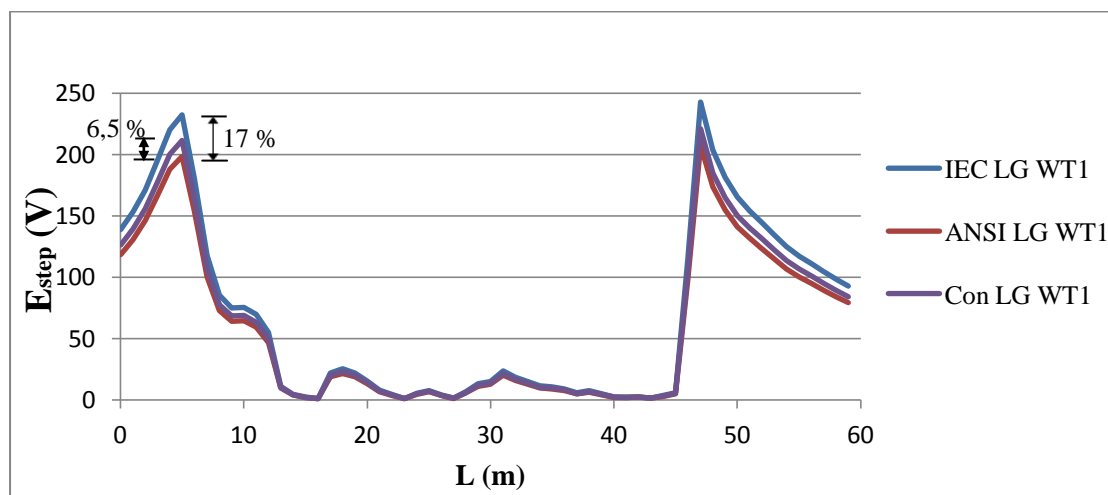
IEC – ANSI

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E_{step}^{IEC/ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} &= \frac{E_{step}^{IEC} - E_{step}^{ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} = \frac{(SP_1 - SP_2)^{IEC} - (SP_1 - SP_2)^{ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} = \\ &= \frac{(SP_1^{IEC} - SP_1^{ANSI}) - (SP_2^{IEC} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} = \frac{(1,1715SP_1^{ANSI} - SP_1^{ANSI}) - (1,1715SP_2^{ANSI} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} \\ &= \frac{0,1715(SP_1^{ANSI} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} = 0,1715 \text{ ή } 17,15\% \end{aligned}$$

CFA – ANSI

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E_{step}^{CFA/ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} &= \frac{E_{step}^{CFA} - E_{step}^{ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} = \frac{(SP_1 - SP_2)^{CFA} - (SP_1 - SP_2)^{ANSI}}{E_{step}^{ANSI}} = \\ &= \frac{(SP_1^{CFA} - SP_1^{ANSI}) - (SP_2^{CFA} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} = \frac{(1,0651SP_1^{ANSI} - SP_1^{ANSI}) - (1,0651SP_2^{ANSI} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} \\ &= \frac{0,0651(SP_1^{ANSI} - SP_2^{ANSI})}{E_{step}^{ANSI}} = 0,0651 \text{ ή } 6,51\% \end{aligned}$$

Πράγματι από τον πίνακα 8.7 παρατηρούμε ότι $\Delta E_{step}^{IEC/ANSI} \approx 17\%$ και $\Delta E_{step}^{CFA/ANSI} \approx 6,5\%$ κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 2 , όπως φαίνεται σχηματικά και στο επόμενο διάγραμμα.



Σχήμα 8.12 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 2

Αντίστοιχα για την τάση επαφής E_{touch} , η οποία ορίζεται σύμφωνα με το Πρότυπο [15] ως η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων ενός ανθρώπου όταν αυτός βρίσκεται σε επαφή με γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο, η % απόκλιση των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ2 είναι ίση με :

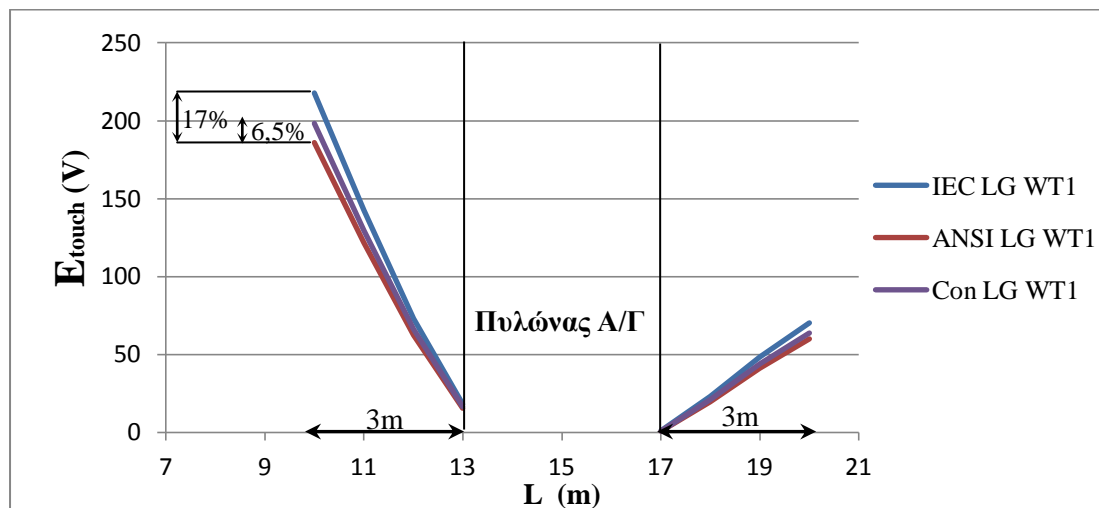
IEC – ANSI

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E_{touch}^{IEC/ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} &= \frac{E_{touch}^{IEC} - E_{touch}^{ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} = \frac{(GPR - SP)^{IEC} - (GPR - SP)^{ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} = \\ &= \frac{(GPR^{IEC} - GPR^{ANSI}) - (SP^{IEC} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} = \frac{(1,1715GPR^{ANSI} - GPR^{ANSI}) - (1,1715SP^{ANSI} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} \\ &= \frac{0,1715(GPR^{ANSI} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} = 0,1715 \text{ ή } 17,15 \% \end{aligned}$$

CFA – ANSI

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E_{touch}^{CFA/ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} &= \frac{E_{touch}^{CFA} - E_{touch}^{ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} = \frac{(GPR - SP)^{CFA} - (GPR - SP)^{ANSI}}{E_{touch}^{ANSI}} = \\ &= \frac{(GPR^{CFA} - GPR^{ANSI}) - (SP^{CFA} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} = \frac{(1,0651GPR^{ANSI} - GPR^{ANSI}) - (1,0651SP^{ANSI} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} \\ &= \frac{0,0651(GPR^{ANSI} - SP^{ANSI})}{E_{touch}^{ANSI}} = 0,0651 \text{ ή } 6,51 \% \end{aligned}$$

Πράγματι από τον πίνακα 8.7 παρατηρούμε ότι $\Delta E_{touch}^{IEC/ANSI} \approx 17\%$ και $\Delta E_{touch}^{CFA/ANSI} \approx 6,5\%$ κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 2, όπως φαίνεται σχηματικά και στο επόμενο διάγραμμα.



Σχήμα 8.13 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 2 σε απόσταση 3 m από τον πυλώνα

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1, το Πρότυπο IEC 60909 δίνει περίπου 17% μεγαλύτερο ρεύμα σφάλματος σε σχέση με το Πρότυπο ANSI C37.010 με αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) κατά μήκος κάθε άξονα σε κάθε σύστημα γείωσης ενώ η μέθοδος CFA δίνει περίπου 6.5% υψηλότερο ρεύμα σφάλματος απ' ότι το ANSI το οποίο μεταφράζεται σε 6.5% αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων.

8.5.2 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στην παρεχόμενη ασφάλεια του αιολικού πάρκου

Το επίπεδο της παρεχόμενης ασφάλειας ενός συστήματος γείωσης κρίνεται από την παραβίαση ή μη των ορίων ασφαλείας των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής. Σε αυτό το σημείο διερευνήθηκε η επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στην παρεχόμενη ασφάλεια, από το διασυνδεδεμένο σύστημα γείωσης του αιολικού πάρκου. Ακολουθεί αναλυτικός έλεγχος τήρησης των ορίων ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος κάθε άξονα σε κάθε τοποθεσία εγκατάστασης των Α/Γ και του Κ/Ε του αιολικού πάρκου, για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ 1 και με τους τρεις τρόπους υπολογισμού αυτού.

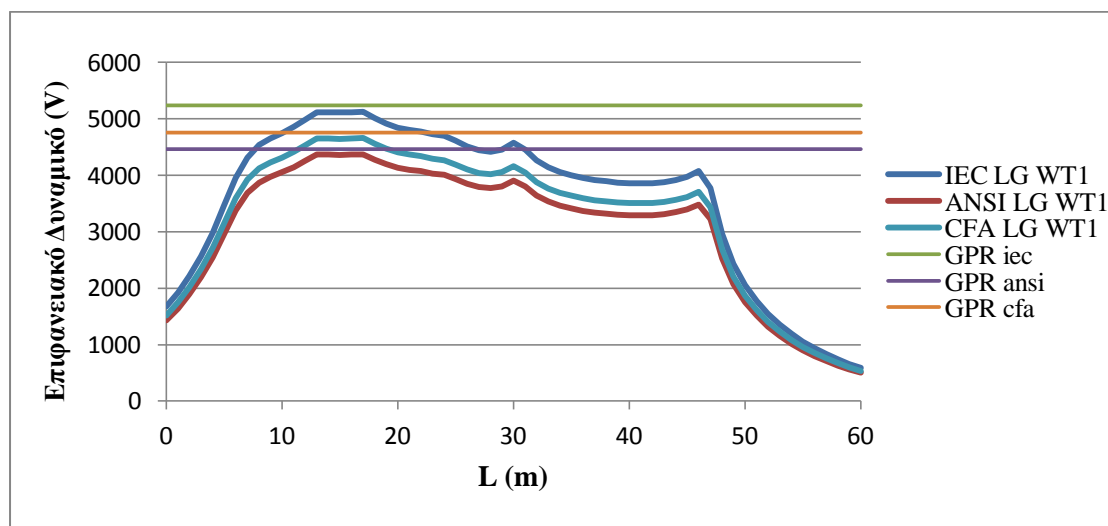
8.5.2.1 Απόκριση Συστήματος Γείωσης Α/Γ 1

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της Α/Γ1 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

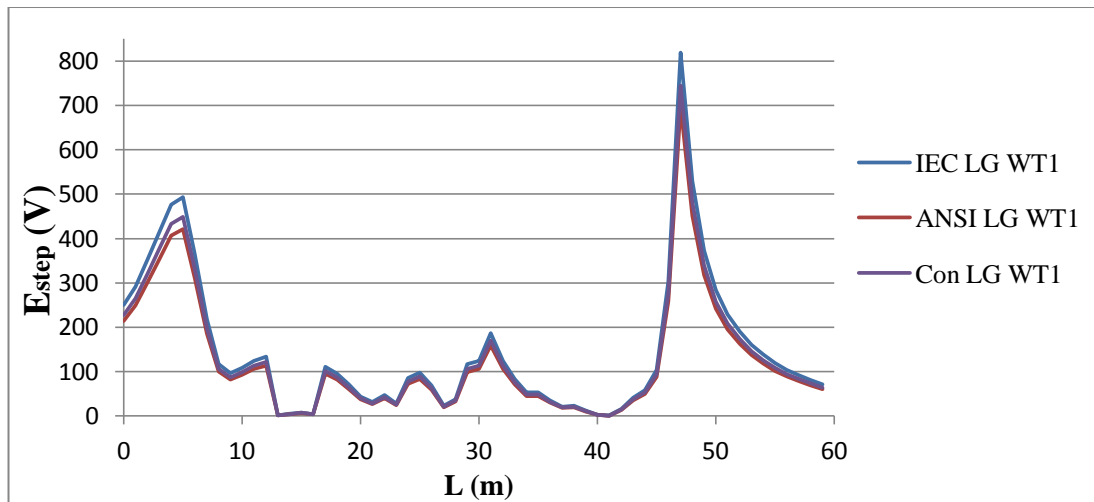
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ω m)	ρ_2 (Ω m)	R_{g1} (Ω)	Z_{eq1} (Ω)	S_{f1}		
A/Γ 1	16,89	5281,03	0,26	50,6	7,17	0,124		
1Φ-Γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	3792,01	5362,72	5132,3	7258,16
I_{g1} (A)	103,33	88,2	93,94	E_{touch} (V)	1034,9	1463,72	1400,82	1981,06
GPR(V)	5234,55	4468,18	4759,03					

Πίνακας 8.8 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της Α/Γ1

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA).

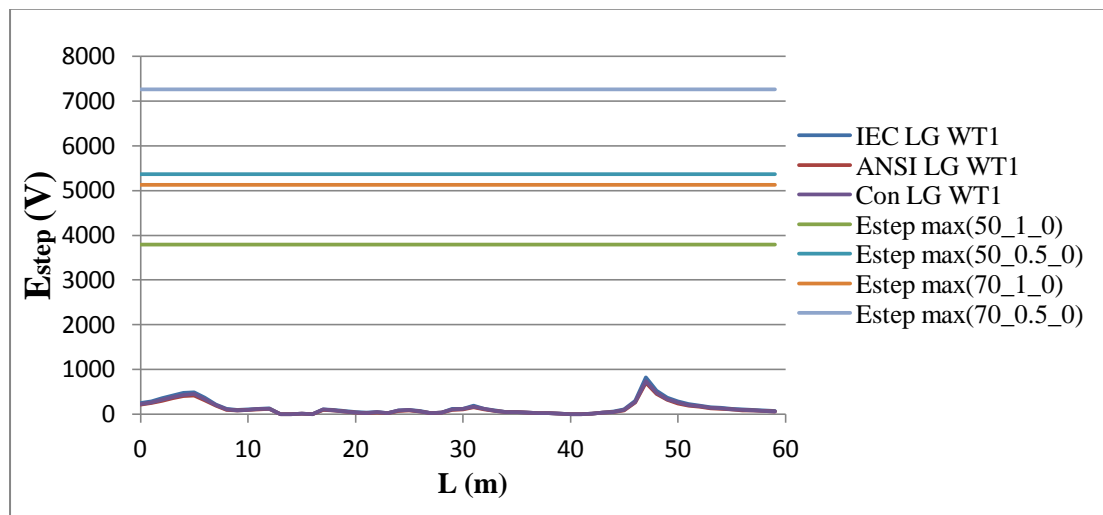


Σχήμα 8.14 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος



Σχήμα 8.15 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

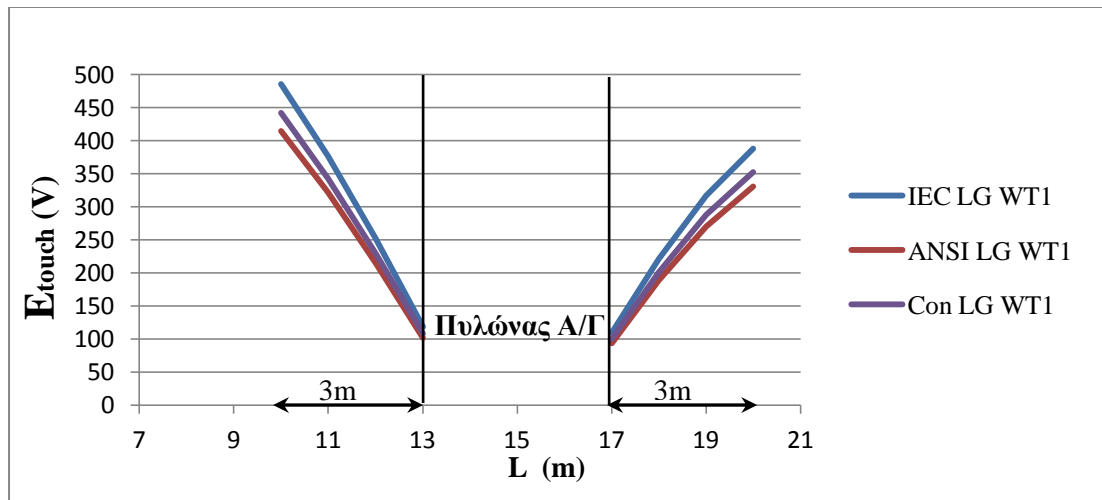
Η δυσμενέστερη συνθήκη ασφάλειας, από άποψη ελαχιστοποίησης του ορίου ασφαλείας για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής, αντιστοιχεί σε σωματικό βάρος 50 kg, χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1sec χωρίς προσθήκη υλικού επιφανείας. Με βάση τις μέγιστες επιτρεπτές βηματικές τάσεις του εδάφους της Α/Γ 1 (βλ.πίνακα 8.8), προκύπτει το ακόλουθο σχήμα :



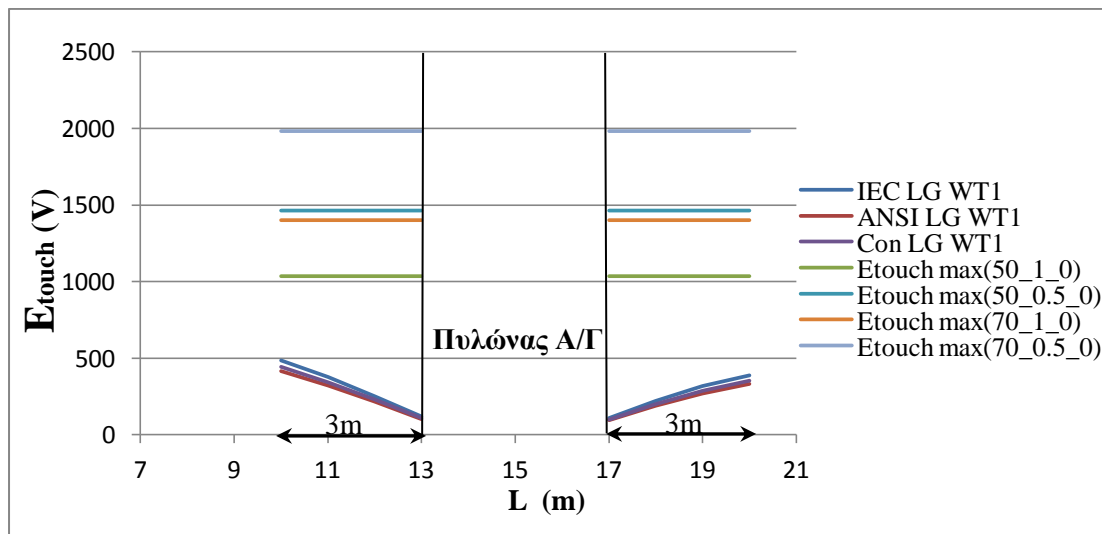
Σχήμα 8.16 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 και όρια ασφαλείας

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, από το άνωθι σχήμα, οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 είναι εντός επιτρεπτών ορίων (< 3792,01 V) και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος .

Αντίστοιχα, ακολουθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1, σε απόσταση 3m από τον πυλώνα αυτής, με και χωρίς τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας (βλ.πίνακα 8.8).

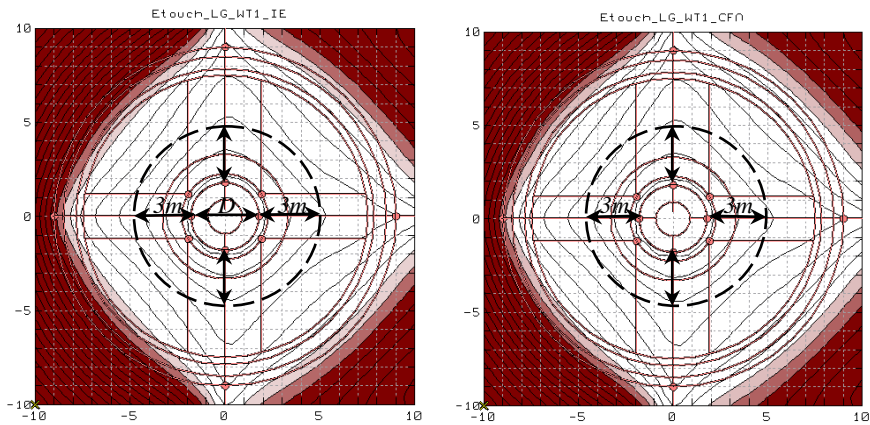


Σχήμα 8.17 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1, σε απόσταση 3m από τον πυλώνα, για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI /CFA)



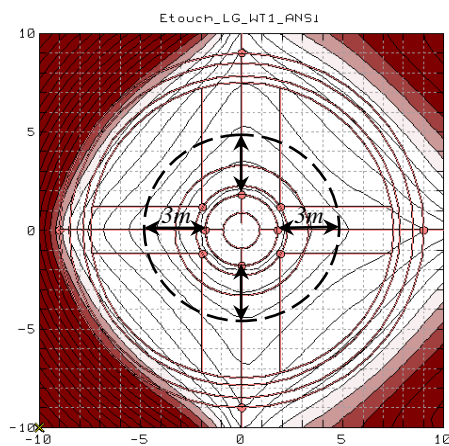
Σχήμα 8.18 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 1 και όρια ασφαλείας

Παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ1 είναι εντός επιτρεπτών ορίων ($< 1034,9V$) και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Όμοια με την διεύθυνση του άξονα (a) οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e κρίνονται ασφαλείς και με τους τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Συνεπώς, το σύστημα γείωσης της Α/Γ1 κρίνεται ασφαλές και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται η λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας). Συμπληρωματικά, παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ1, με τρεις τρόπους υπολογισμού του μονοφασικού σφάλματος στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1.

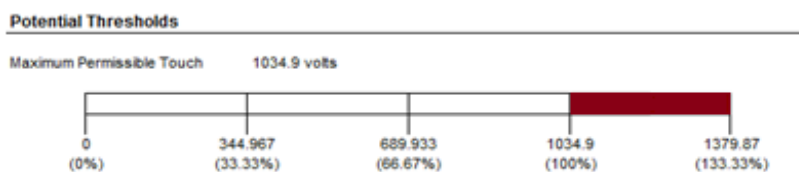


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.19 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ1, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $h_s=0\text{ m}$.

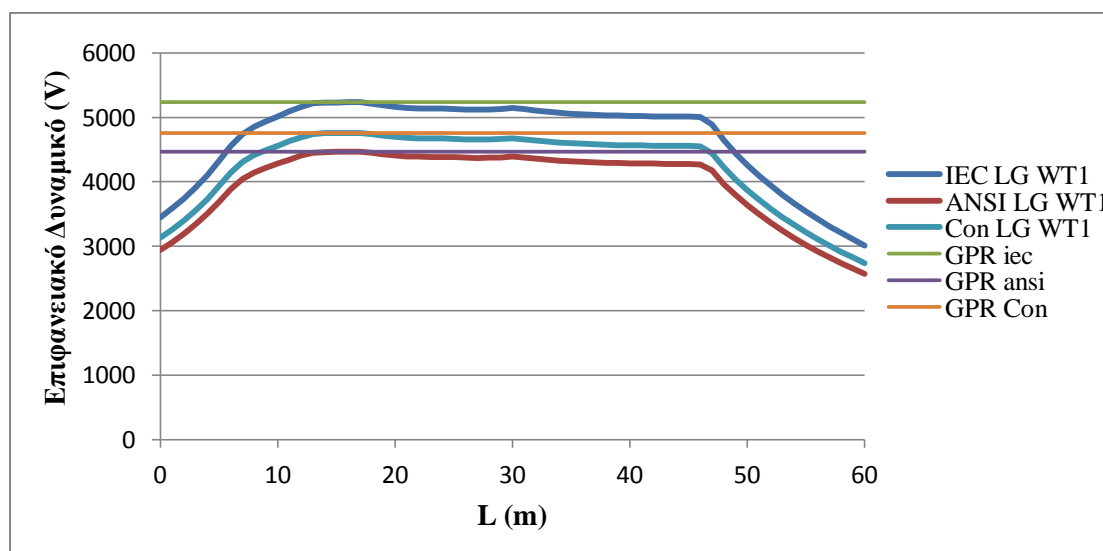
8.5.2.2 Απόκριση Συστήματος Γείωσης A/Γ 2

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της A/Γ2 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

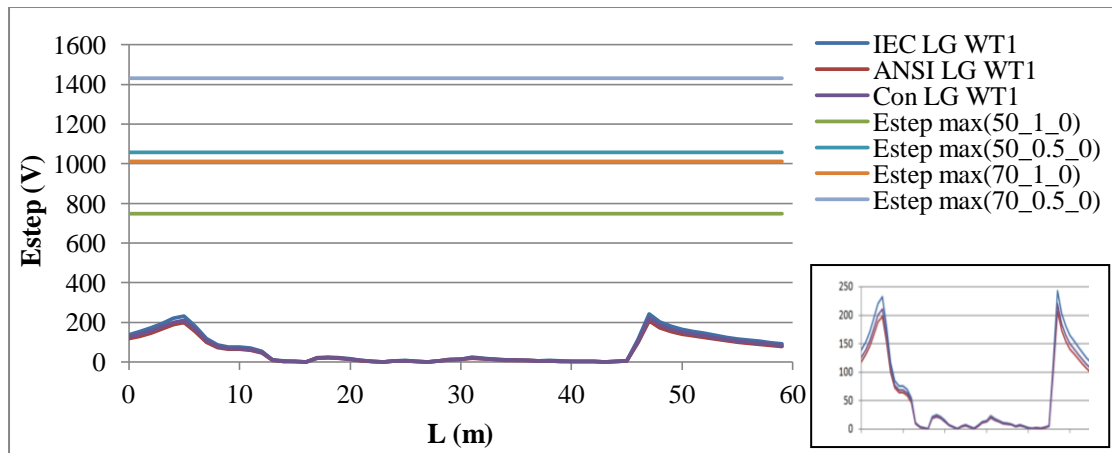
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g2} (Ω)	Z_{eq2} (Ω)	S_{f2}		
A/Γ 2	2	908,29	7207,08	59,2	7,02	0,106		
1Φ-Γη A/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	748,17	1058,07	1012,61	1432,05
I_{g2} (A)	88,33	75,4	80,31	E_{touch} (V)	274,04	387,5	370,9	524,54
GPR (V)	5234,55	4468,18	4759,02					

Πίνακας 8.9 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της A/Γ2

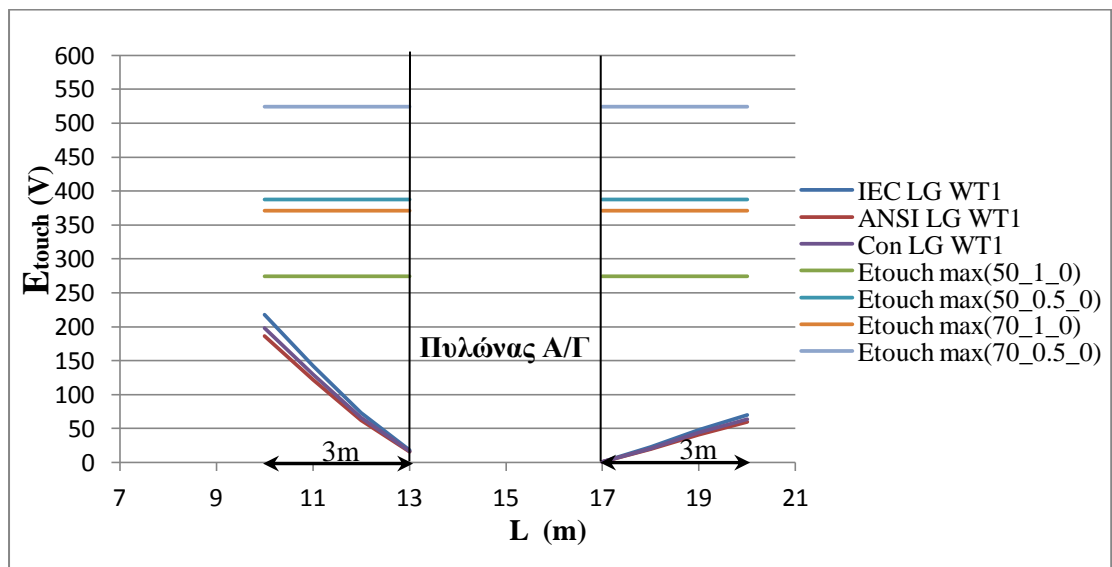
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ2, για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/ CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.20 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 2 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

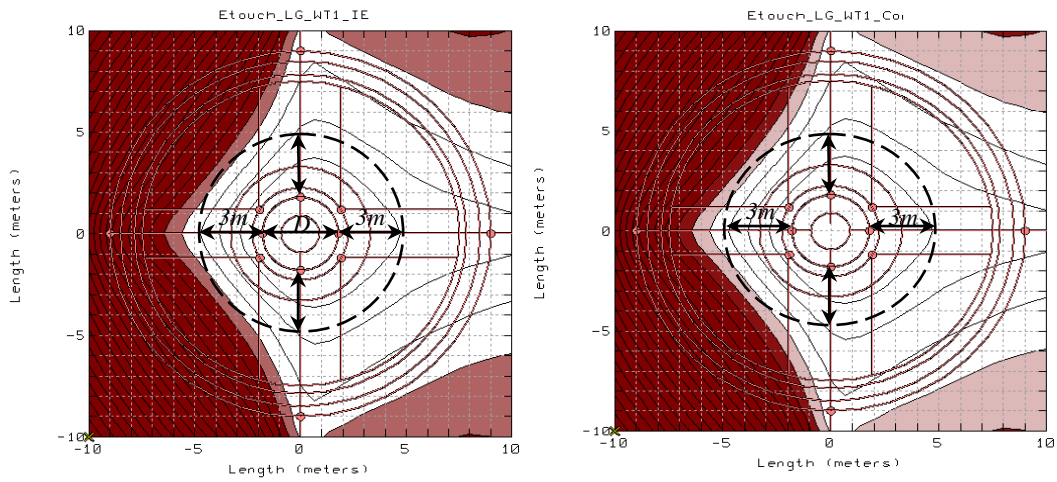


Σχήμα 8.21 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 2 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος



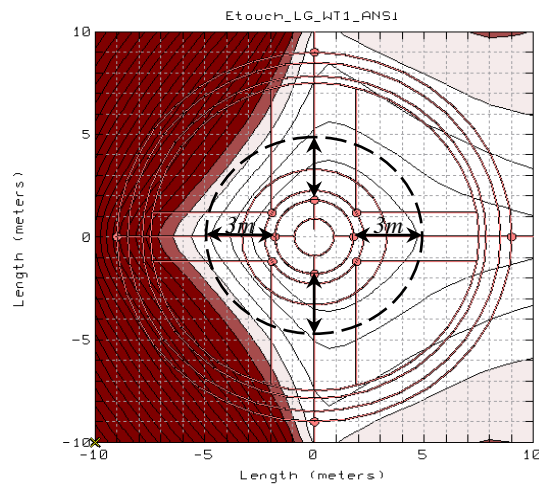
Σχήμα 8.22 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 2 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

Από τα σχήματα (8.21) και (8.22) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 2 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 2, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).

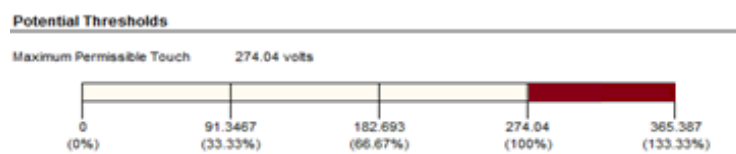


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.23 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ2, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $h_s=0\text{m}$.

Στο σχήμα 8.23 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 274,04 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ 2. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ 2 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

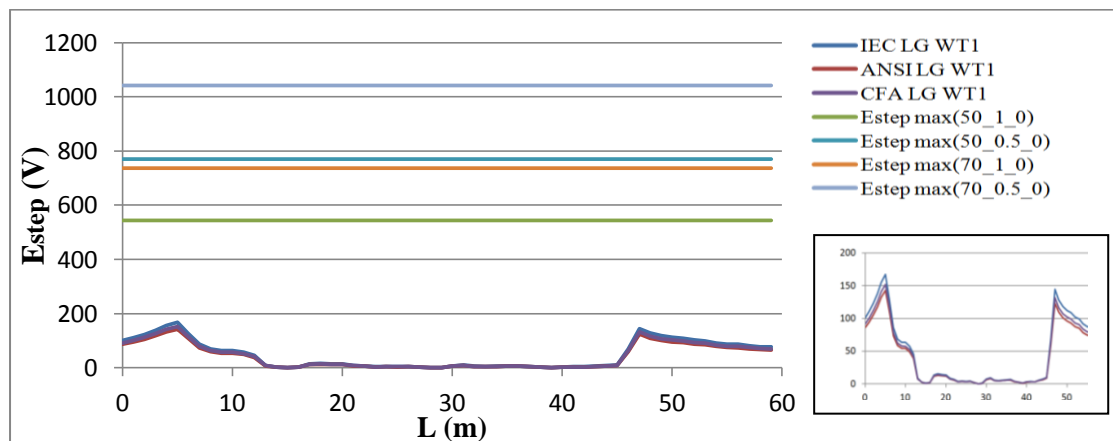
8.5.2.3 Απόκριση Συστήματος Γείωσης Α/Γ 3

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της Α/Γ3 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

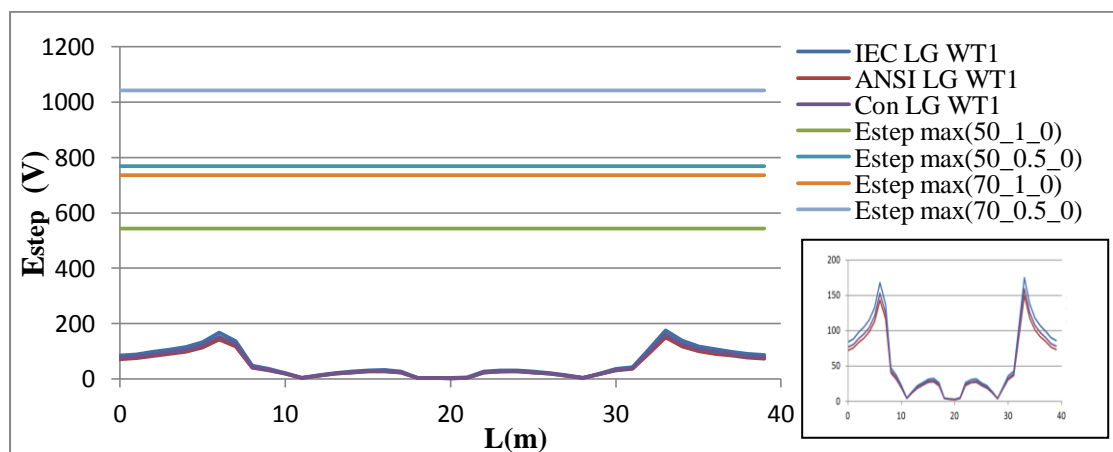
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g3} (Ω)	Z_{eq3} (Ω)	S_{f3}		
Α/Γ 3	2	615,08	17177	79,2	6,82	0,079		
1Φ-Γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	544,1	769,47	736,41	1041,43
I_{g3} (A)	65,83	56,19	59,85	E_{touch} (V)	223,02	315,4	301,85	426,88
GPR (V)	5234,55	4468,18	4759,03					

Πίνακας 8.10 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της Α/Γ3

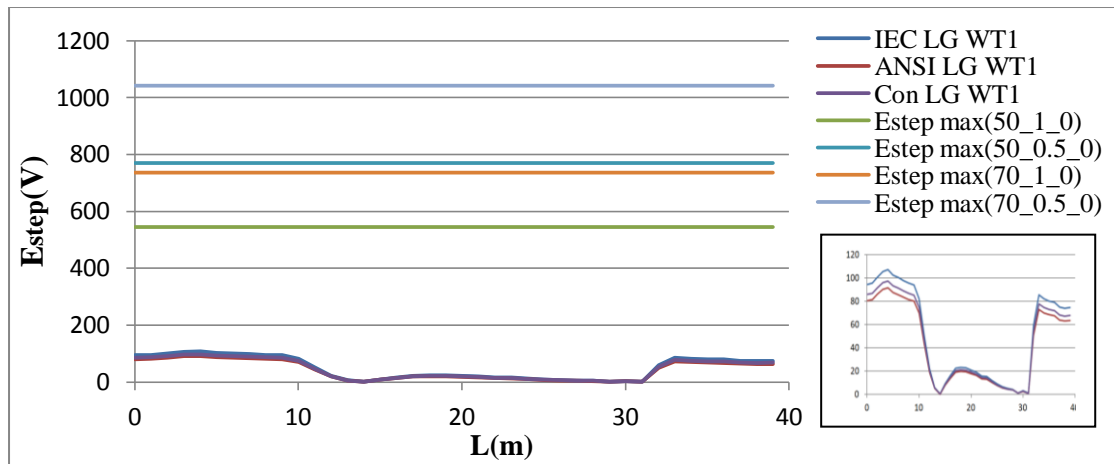
Η κατανομή των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων κατά μήκος των αξόνων (α), (β), (c), (d) και (e) της Α/Γ 3, ακολουθεί στα επόμενα σχήματα, για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος τήρησης αυτών.



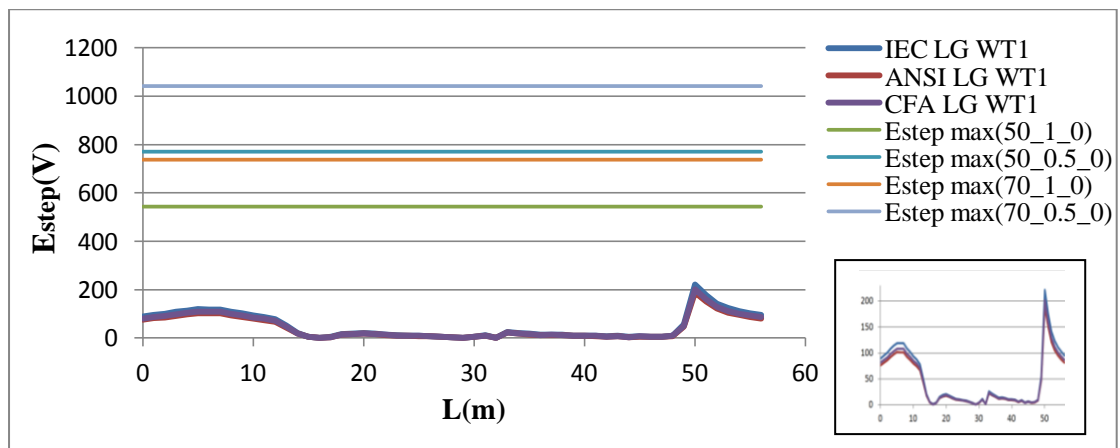
(α)



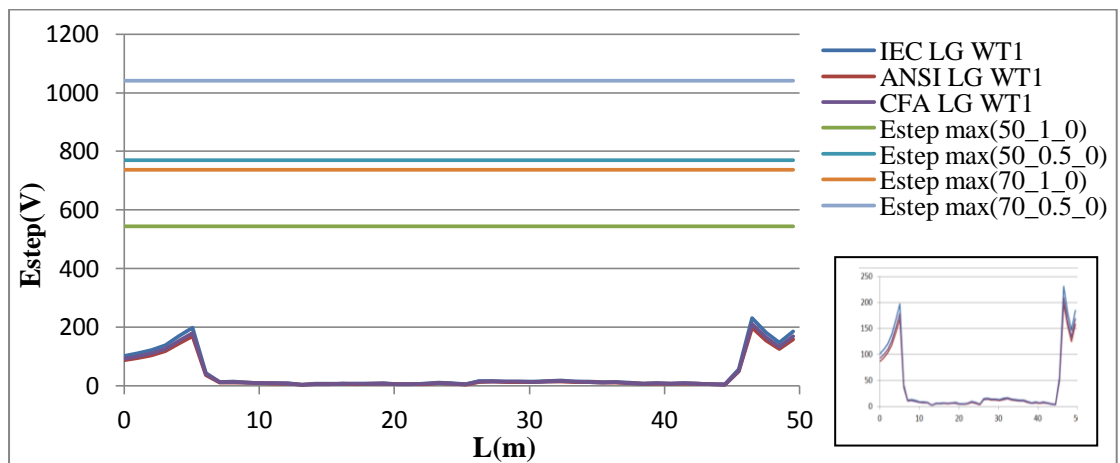
(β)



(γ)



(δ)



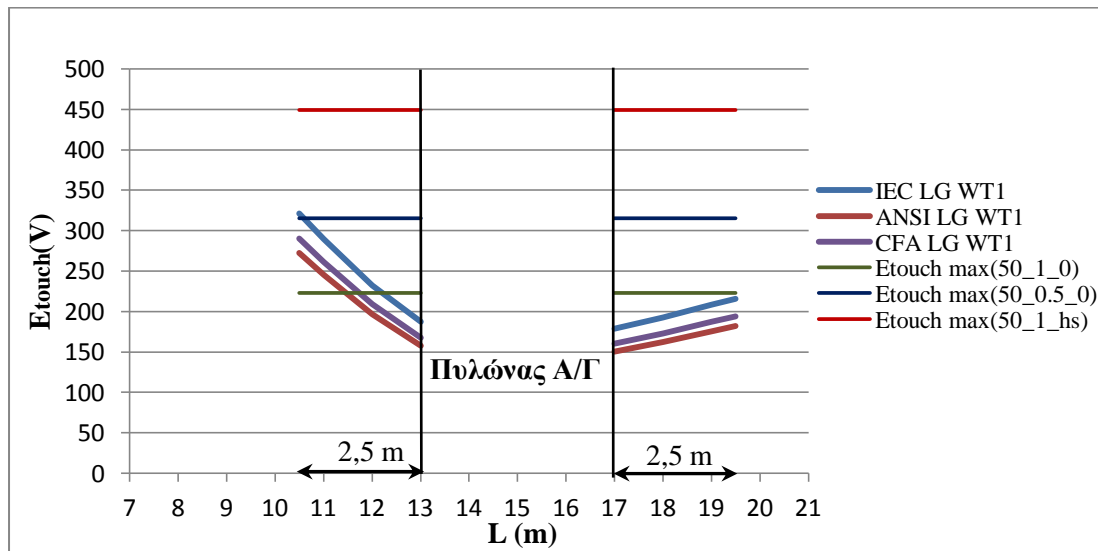
(ε)

Σχήμα 8.24 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην επιφάνεια του εδάφους της Α/Γ3 με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA)

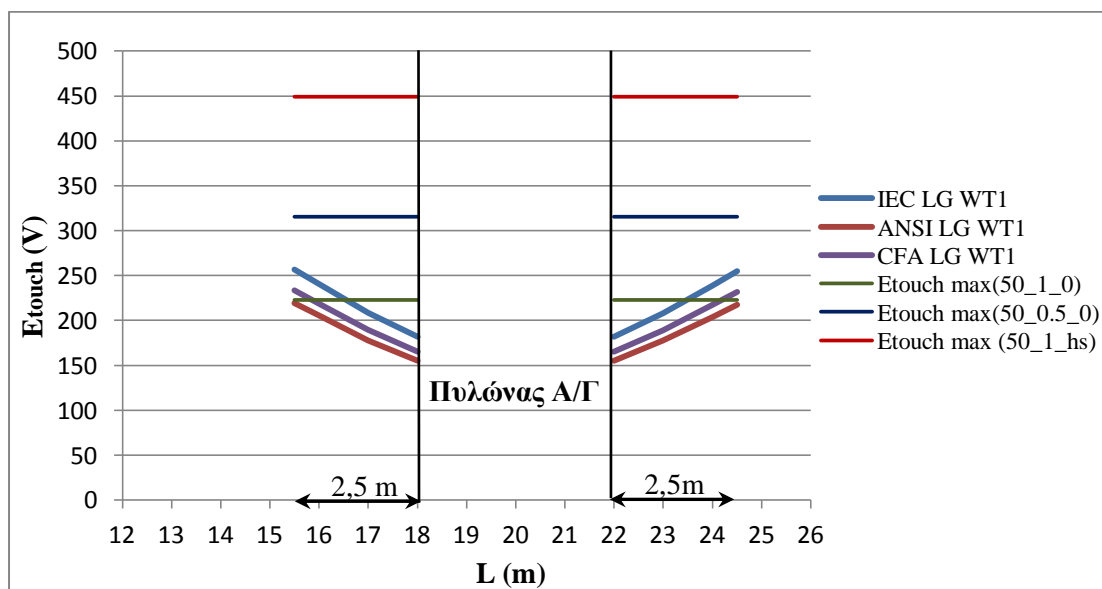
(α) κατά μήκος του άξονα (α) , (β) κατά μήκος του άξονα (β) , (γ) κατά μήκος του άξονα (c) , (δ) κατά μήκος του άξονα (d) , (ε) κατά μήκος του άξονα (e)

Από το σχήμα 8.24 παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην επιφάνεια του εδάφους της Α/Γ 3 κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c), (d) και (e) είναι εντός ορίων ($< 544,1\text{V}$) και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA). Συνεπώς, το σύστημα γείωσης της Α/Γ 3 κρίνεται ασφαλές, ως προς τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος.

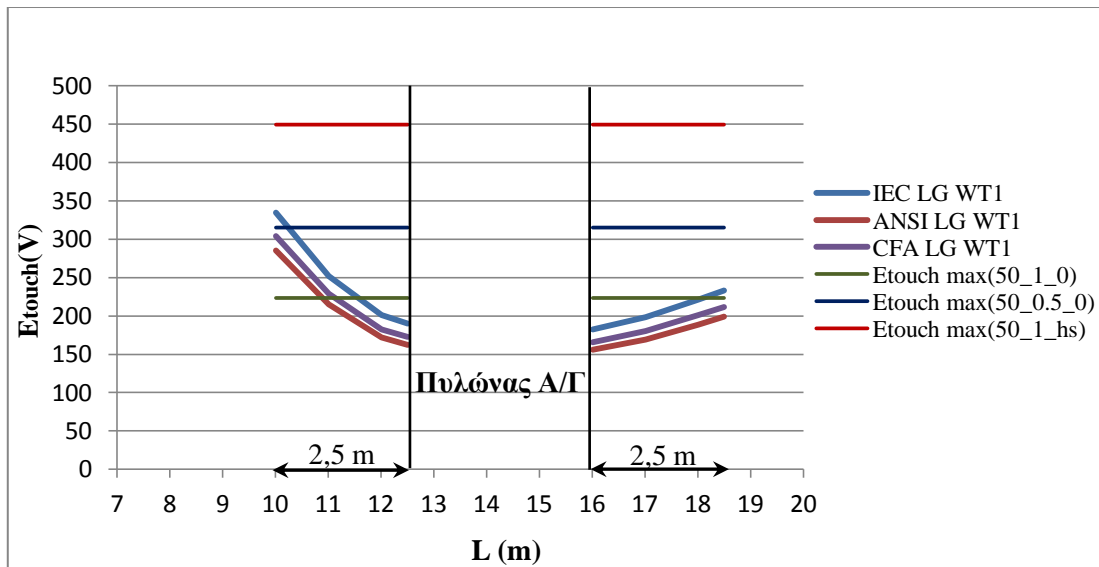
Στο σχήμα 8.25 που ακολουθεί, έχουν υπολογιστεί οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c) και (d) σε απόσταση μέχρι 2.5 m από τον πυλώνα της Α/Γ3. Επειδή κατά μήκος του άξονα (e) η απόσταση από τον πυλώνα της Α/Γ είναι μεγαλύτερη από 7 m, δεν υπολογίζονται τάσεις επαφής καθώς είναι αδύνατον να αναπτυχθούν κατά μήκος αυτού.



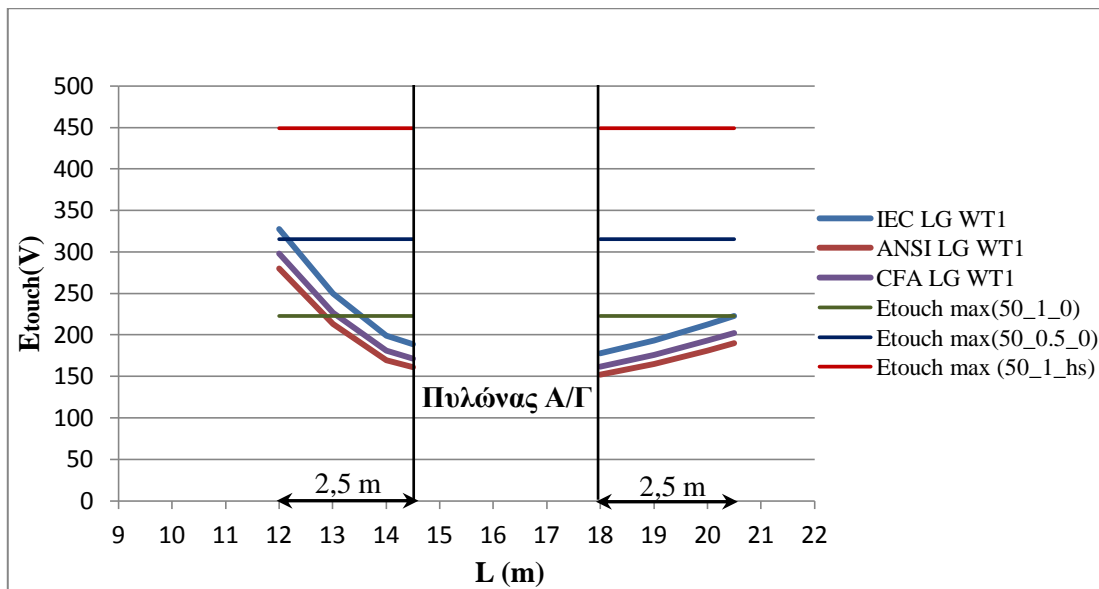
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 8.25 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση 2.5 m από τον πυλώνα της Α/Γ3 με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA)

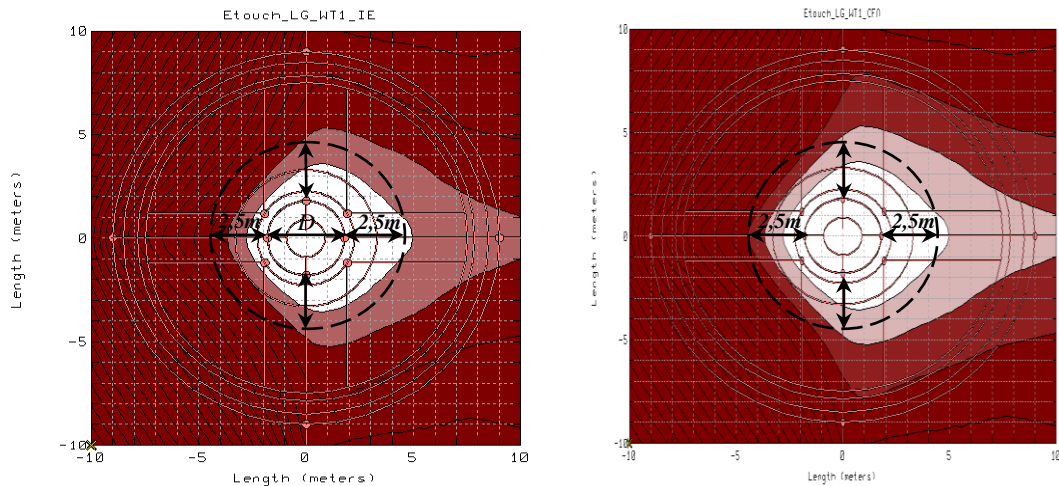
(α) κατά μήκος του άξονα (α)

(β) κατά μήκος του άξονα (β)

(γ) κατά μήκος του άξονα (γ)

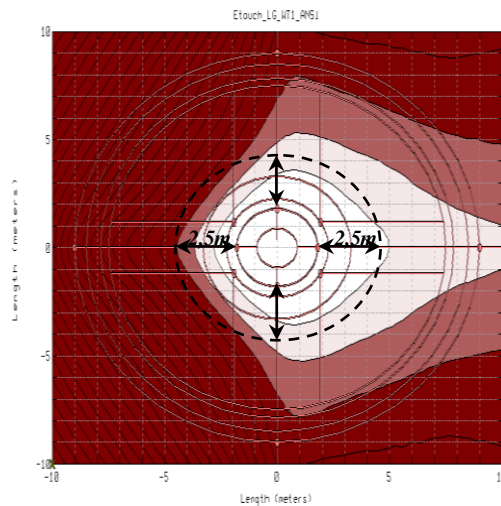
(δ) κατά μήκος του άξονα (δ)

Από το σχήμα 8.25 παρατηρούμε ότι και με τρεις μεθόδους το σύστημα γείωσης της Α/Γ 3 οδηγεί σε επικίνδυνες τάσεις επαφής κατά μήκος των αξόνων (α), (β), (γ) και (δ), παραβιάζοντας το όριο ασφαλείας των 223,02 V αρκετά πριν τα 2.5m. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ 3 κρίνεται μη ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο επόμενο σχήμα.

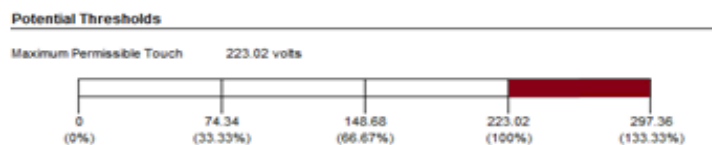


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.26 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ3, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $h_s = 0\text{m}$

Για την αντιμετώπιση των επικίνδυνων τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται σε απόσταση μικρότερη των 2,5 m από τον πυλώνα της Α/Γ 3, οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις είναι οι εξής :

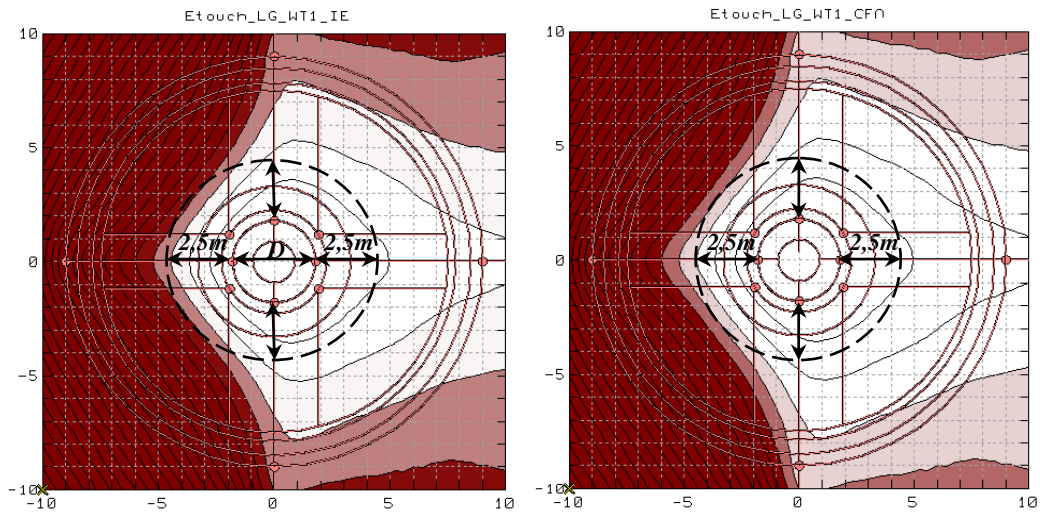
1. Κατάλληλη ρύθμιση του εξοπλισμού προστασίας, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος να μειωθεί στο 0,5sec.
2. Επίστρωση του εδάφους με υλικό επιφανείας (χαλίκι) πάχους 10cm και ειδικής αντίστασης 2500 Ωm.

Με τους δύο αυτούς τρόπους επιτυγχάνεται η αύξηση των ορίων για τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.11 που ακολουθεί ή γραφικά στο σχήμα 8.25.

B=50kg	1 sec		0.5 sec	
Υλικό Επιφανείας	Estep[V]	Etouch[V]	Estep[V]	Etouch[V]
-----	544,1	223,02	769,47	315,4
Χαλίκι	1448,86	449,21	2048,99	635,28

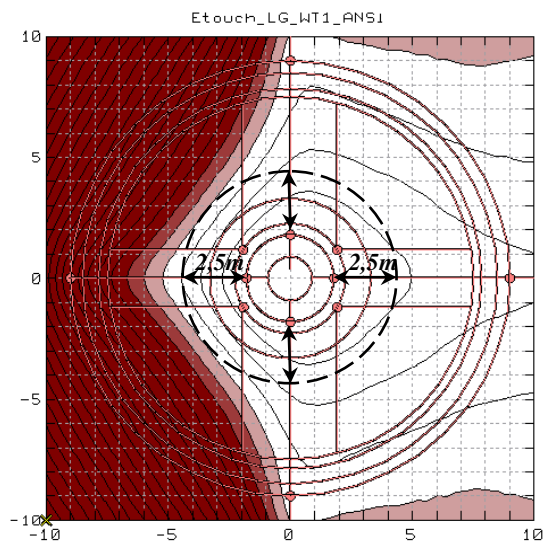
Πίνακας 8.11 Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές βηματικής τάσης και τάσης επαφής για το έδαφος της Α/Γ3

- Η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος (t_f) από 1 sec στο 0.5 sec οδηγεί σε αύξηση του ορίου ασφαλείας για τις τάσεις επαφής στα 315,4 V. Από το σχήμα 8.25 παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI και την μέθοδο CFA το σύστημα γείωσης της Α/Γ3 δίνει ασφαλείς τάσεις επαφής σε απόσταση 2,5m από τον πυλώνα, κατά μήκος των αξόνων (a) - (d). Σύμφωνα όμως, με το Πρότυπο IEC στο σύστημα γείωσης της Α/Γ3 αναπτύσσονται επικίνδυνες τάσεις επαφής σε απόσταση 2,5m από τον πυλώνα κατά μήκος των αξόνων (a), (c) και (d). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Πρότυπο IEC δίνει περίπου 17% μεγαλύτερες τιμές για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε σχέση με το Πρότυπο ANSI ενώ η μέθοδος CFA συνεπάγεται αύξηση τάσεων περίπου 6,5% , για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1. Συνεπώς, παρά την μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος το σύστημα γείωσης της Α/Γ3 κρίνεται, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC, μη ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής (βλ.σχήμα 8.27), με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η προσθήκη υλικού επιφανείας.

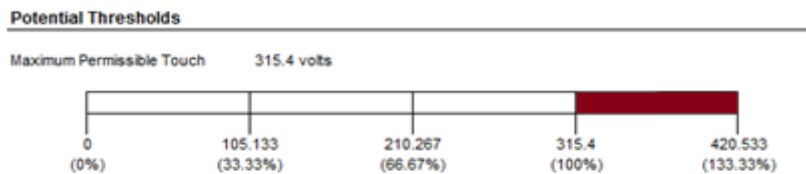


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



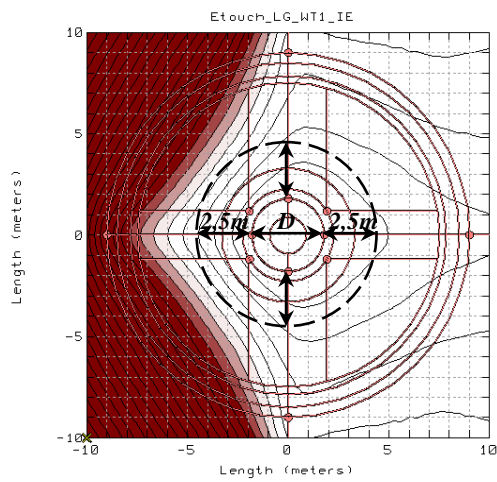
γ) ANSI C 37.010



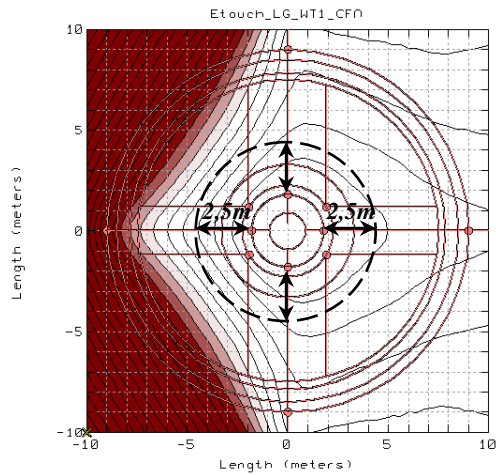
Σχήμα 8.27 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ3, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 0.5\text{sec}$, $h_s = 0\text{m}$

- Με την προσθήκη υλικού επιφανείας (χαλίκι), στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης της Α/Γ 3, επιτυγχάνεται ακόμη μεγαλύτερη αύξηση του ορίου ασφαλείας για τις τάσεις επαφής ($E_{\text{touch max}} = 449,21\text{V}$). Από το σχήμα 8.25

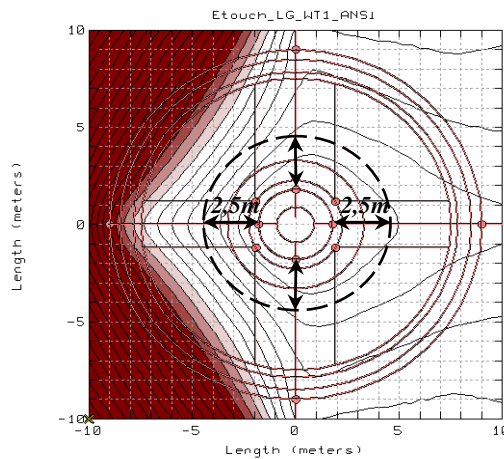
παρατηρούμε ότι με προσθήκη υλικού επιφανείας και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), το σύστημα γείωσης της Α/Γ3 δίνει ασφαλείς τάσεις επαφής, σε απόσταση 2,5m από τον πυλώνα, κατά μήκος κάθε άξονα (α)-(δ). Τελικά, μετά την προσθήκη υλικού επιφανείας (χαλίκι) το σύστημα γείωσης της Α/Γ3 καθίσταται απόλυτα ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα που ακολουθεί.



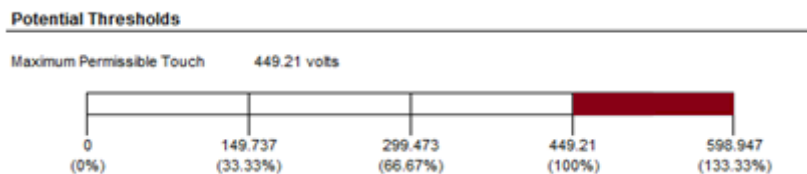
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.28 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ3, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $\{h_s=10\text{ cm}, \rho_s=2500\ \Omega\text{m}\}$

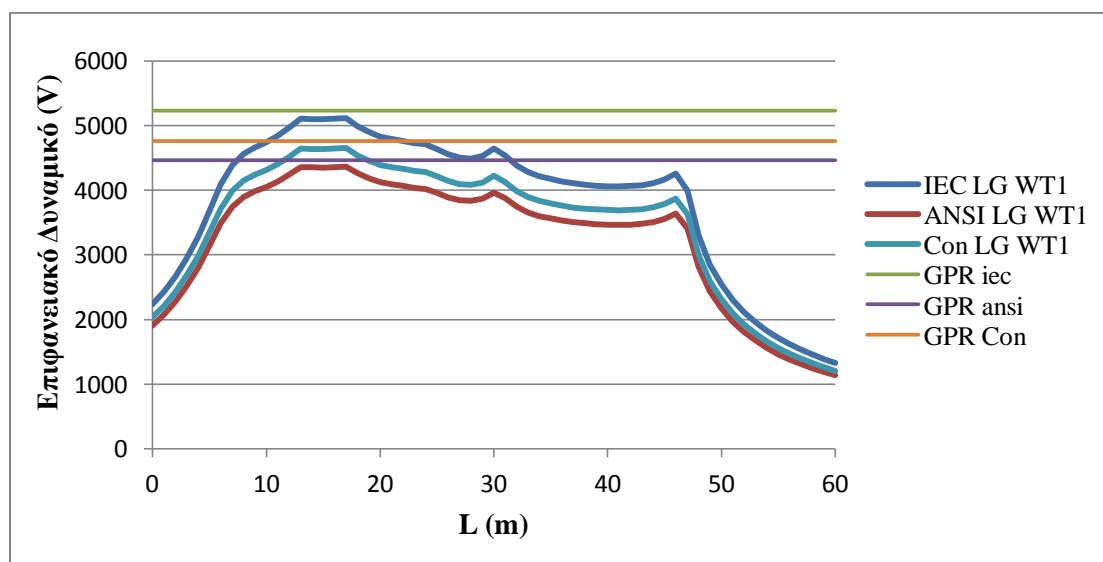
8.5.2.4 Απόκριση Συστήματος Γείωσης Α/Γ 4

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της Α/Γ4 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

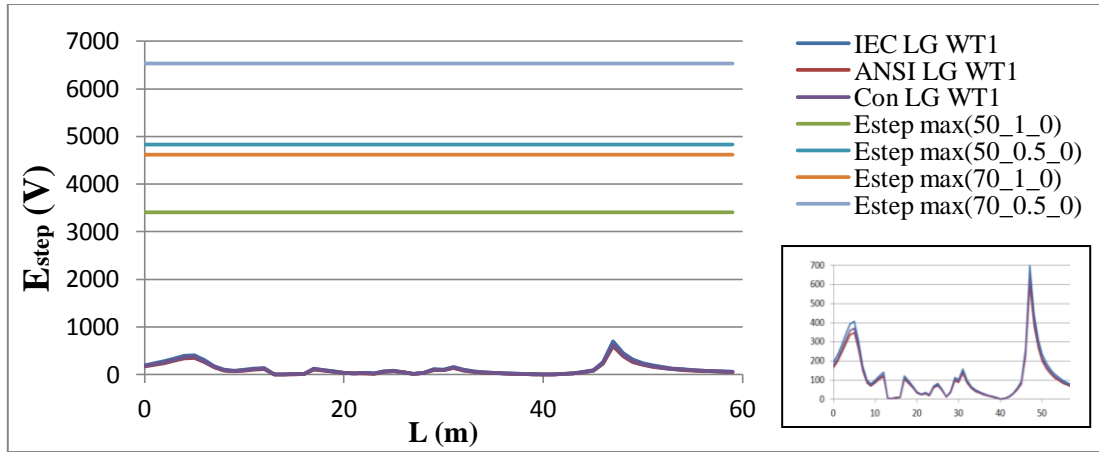
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g4} (Ω)	Z_{eq4} (Ω)	S_{f4}		
A/Γ 4	6,16	4737,51	2397,28	51,2	7,16	0,123		
1Φ-Γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	3413,31	4827,14	4619,73	6533,29
I_{g4} (A)	102,5	87,49	93,18	E_{touch} (V)	940,33	1329,82	1272,68	1799,85
GPR V)	5234,48	4468,12	4758,96					

Πίνακας 8.12 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της Α/Γ4

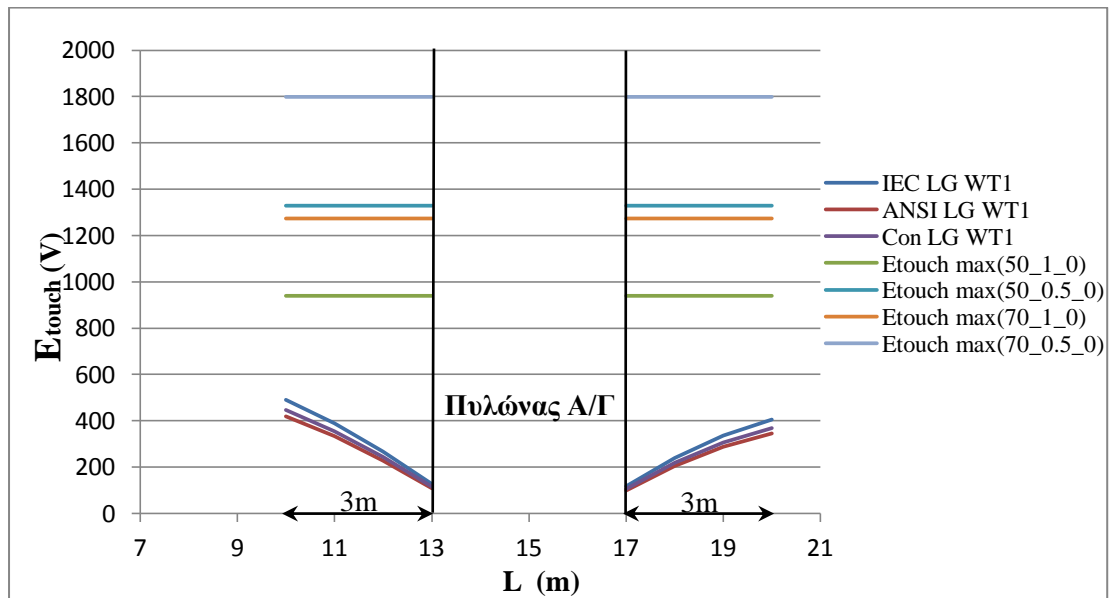
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ4 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/ CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.29 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ4 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

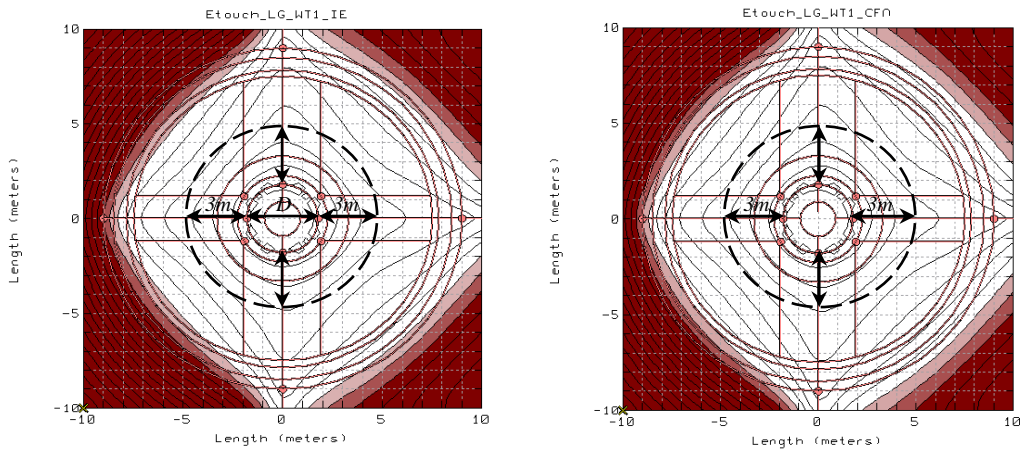


Σχήμα 8.30 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 4 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος



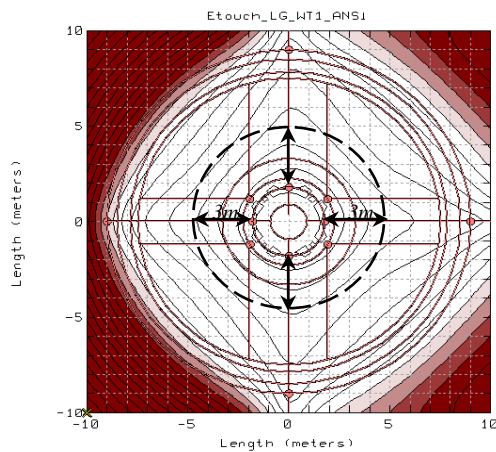
Σχήμα 8.31 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 4 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

Από τα σχήματα (8.30) και (8.31) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 4 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 4, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).

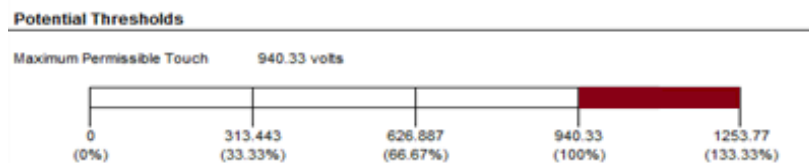


α) IEC 60909

β) Convetional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.32 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ4, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $h_s=0\text{m}$

Στο σχήμα 8.32 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 940,33 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ4. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ4 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

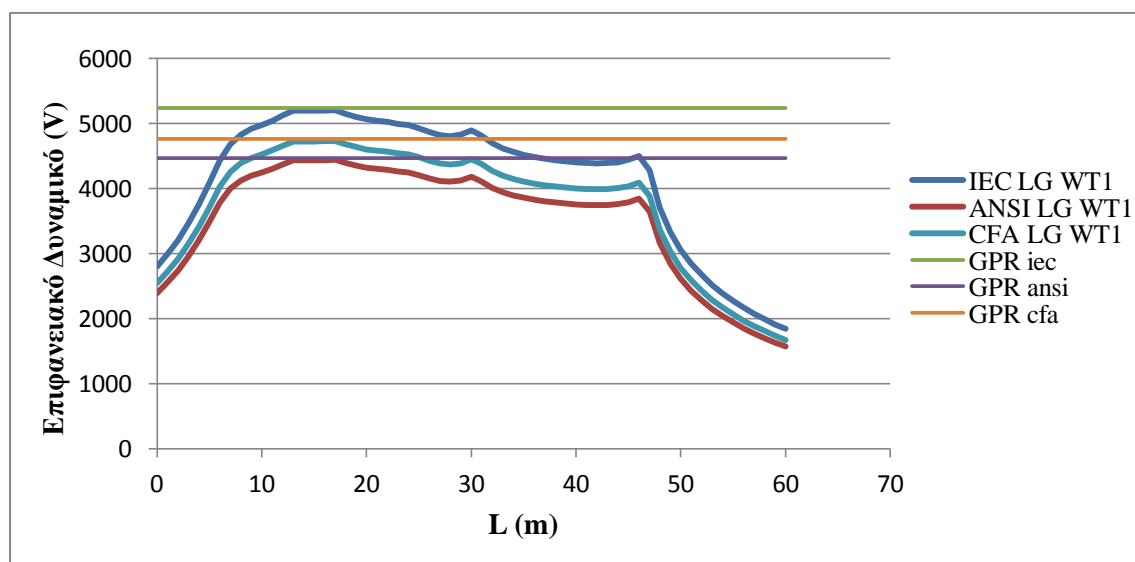
8.5.2.5 Απόκριση Συστήματος Γείωσης A/Γ 5

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της A/Γ5 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

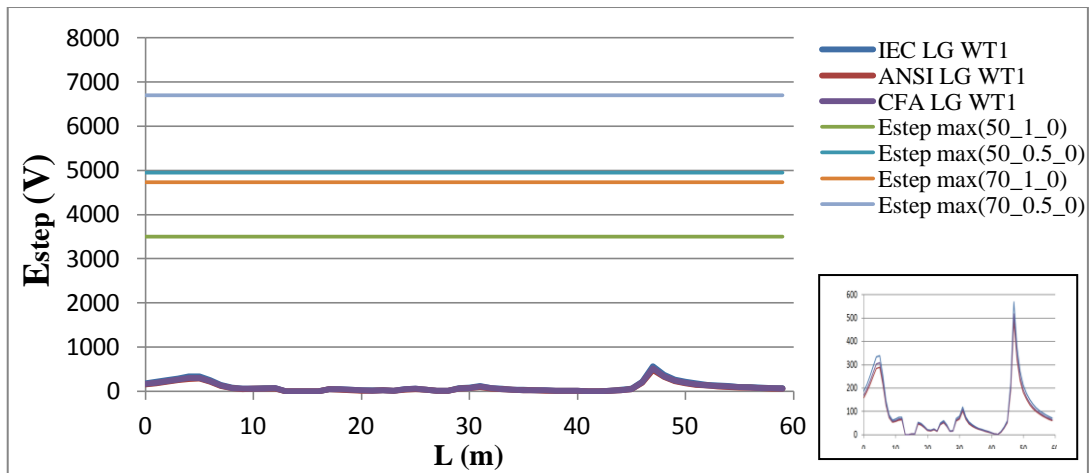
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g5} (Ω)	Z_{eq5} (Ω)	S_{f5}		
A/Γ 5	100	4857,88	4857,88	72,4	6,88	0,087		
1Φ-Γη A/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	3497,08	4945,62	4733,12	6693,65
I_{g5} (A)	72,5	61,88	65,91	E_{touch} (V)	961,27	1359,44	1301,03	1839,94
GPR V)	5234,55	4468,18	4759,02					

Πίνακας 8.13 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της A/Γ5

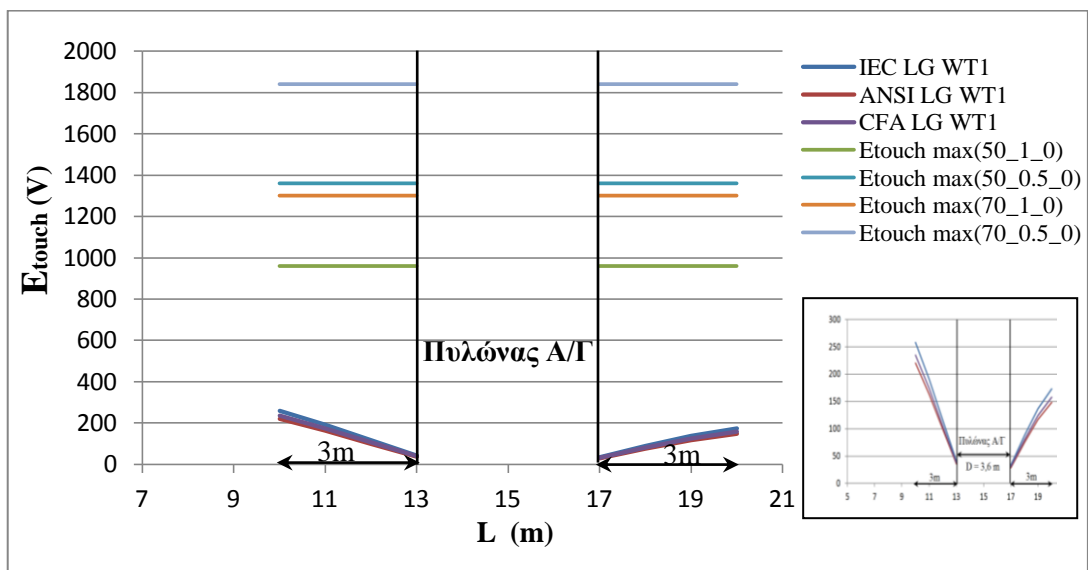
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 5 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/ CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.33 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 5 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

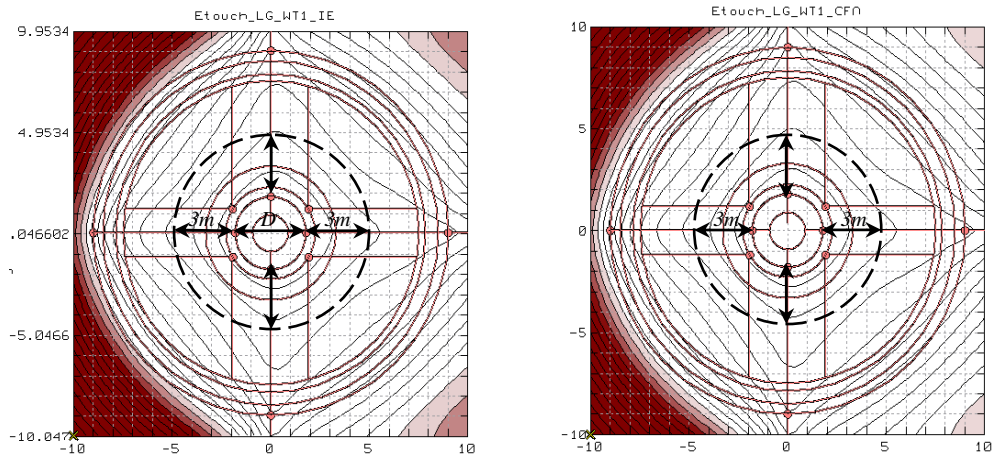


Σχήμα 8.34 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 5 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος



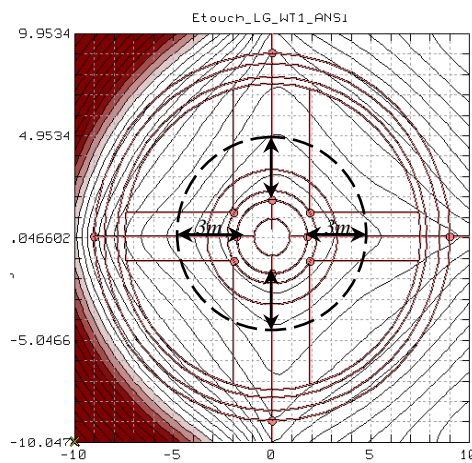
Σχήμα 8.35 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 5 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

Από τα σχήματα (8.34) και (8.35) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 5 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 5, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).

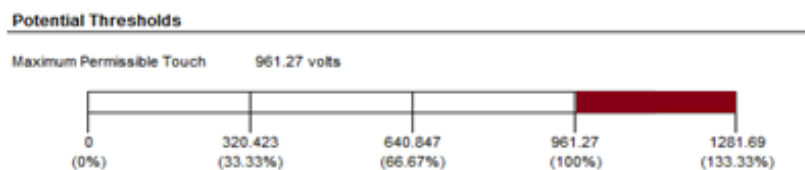


α) IEC 60909

β) Convetional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.36 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ5, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $h_s=0\text{m}$

Στο σχήμα 8.36 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 961,27 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ5. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ5 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

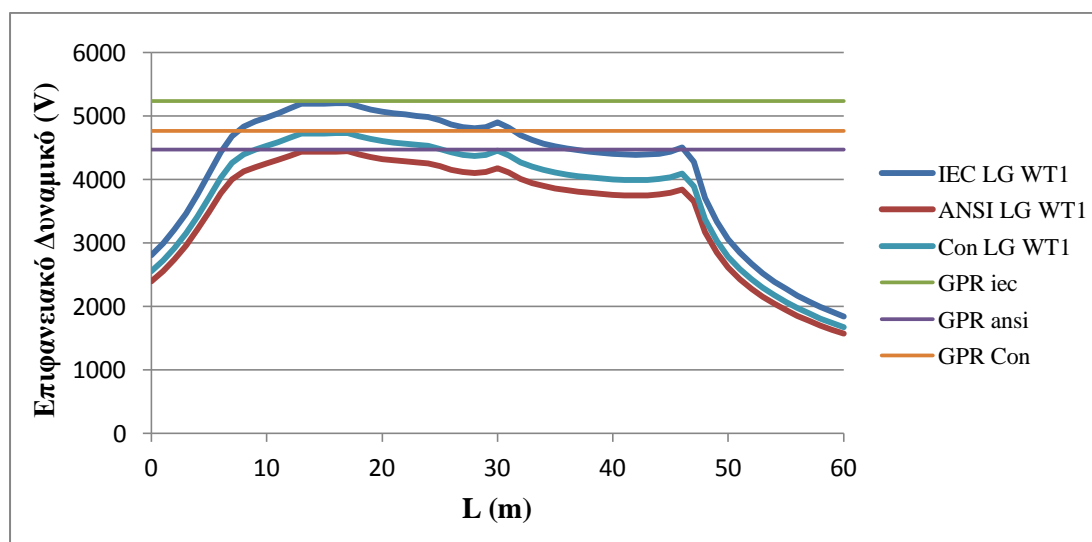
8.5.2.6 Απόκριση Συστήματος Γείωσης A/Γ 6

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της A/Γ6 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

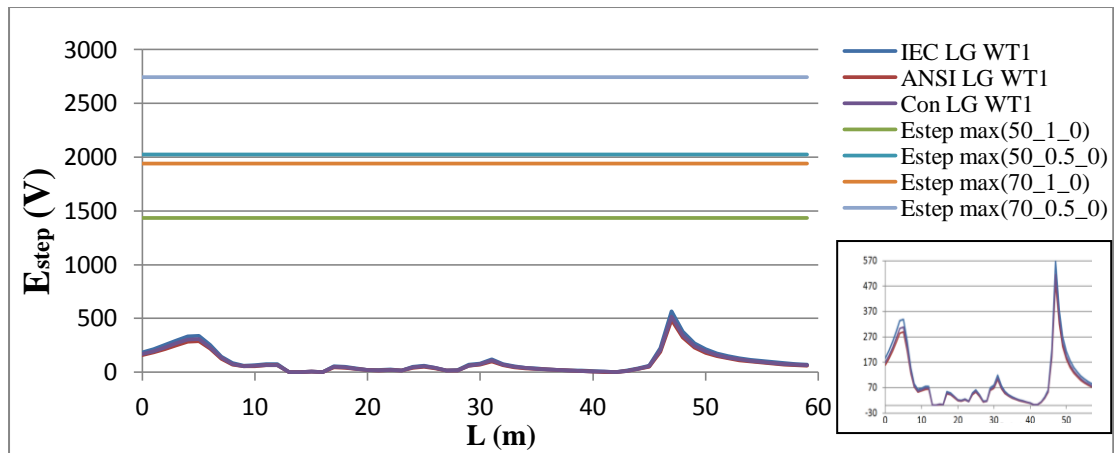
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g6} (Ω)	Z_{eq6} (Ω)	S_{f6}		
A/Γ 6	100	1891,47	1891,47	28,2	8,08	0,223		
1Φ-Γη A/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	1432,46	2025,81	1938,76	2741,83
I_{g6} (A)	185,83	158,62	168,94	E_{touch} (V)	445,12	629,49	602,44	851,98
GPR (V)	5234,56	4468,19	4759,03					

Πίνακας 8.14 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της A/Γ6

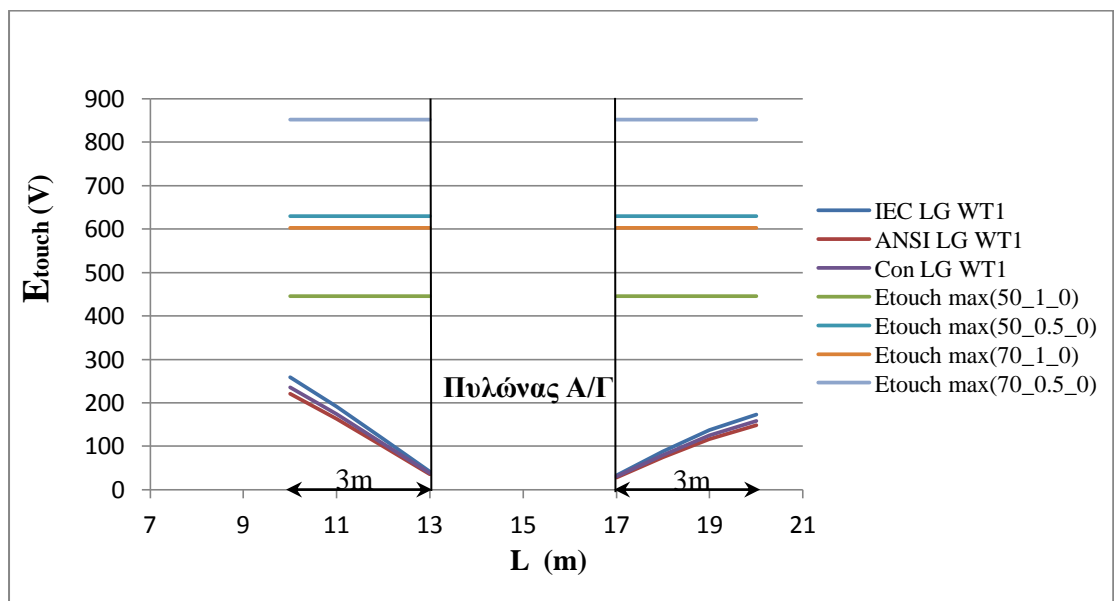
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 6 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/ CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.37 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 6 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

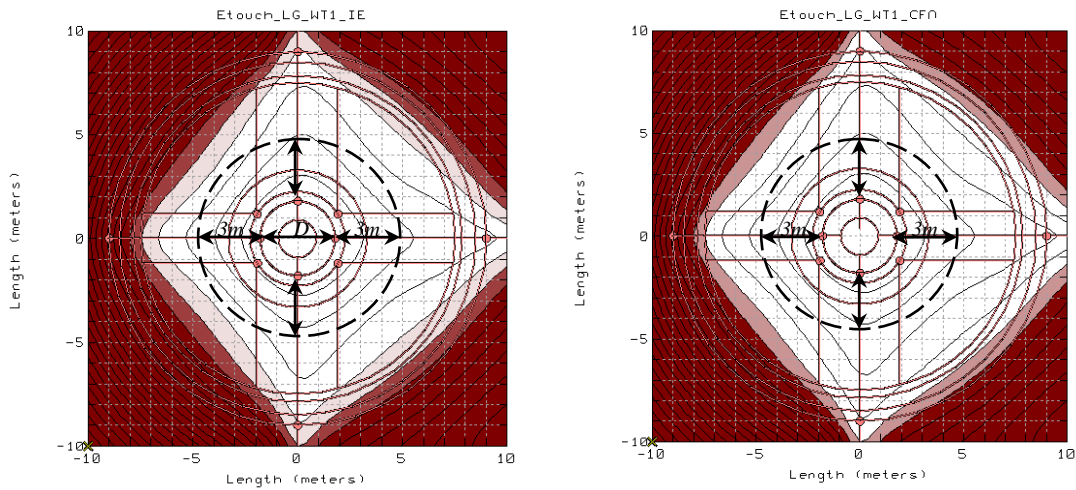


Σχήμα 8.38 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 6 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος



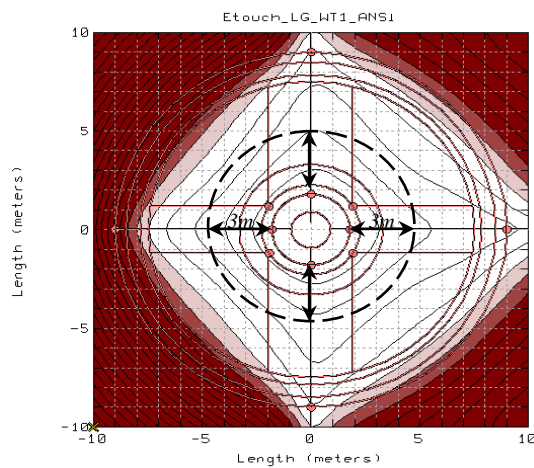
Σχήμα 8.39 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 6 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

Από τα σχήματα (8.38) και (8.39) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 6 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 6, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).

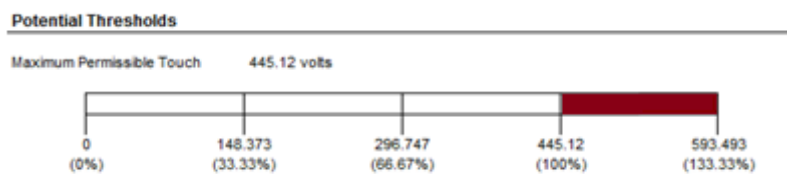


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.40 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ6, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $h_s = 0\text{ m}$.

Στο σχήμα 8.40 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 445,12 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ6. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ6 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

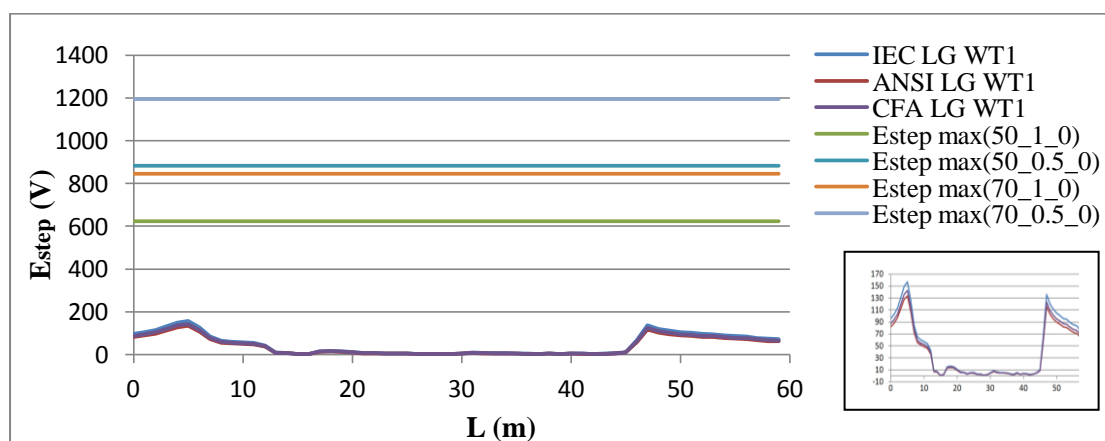
8.5.2.7 Απόκριση Συστήματος Γείωσης A/Γ 7

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της A/Γ 7 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

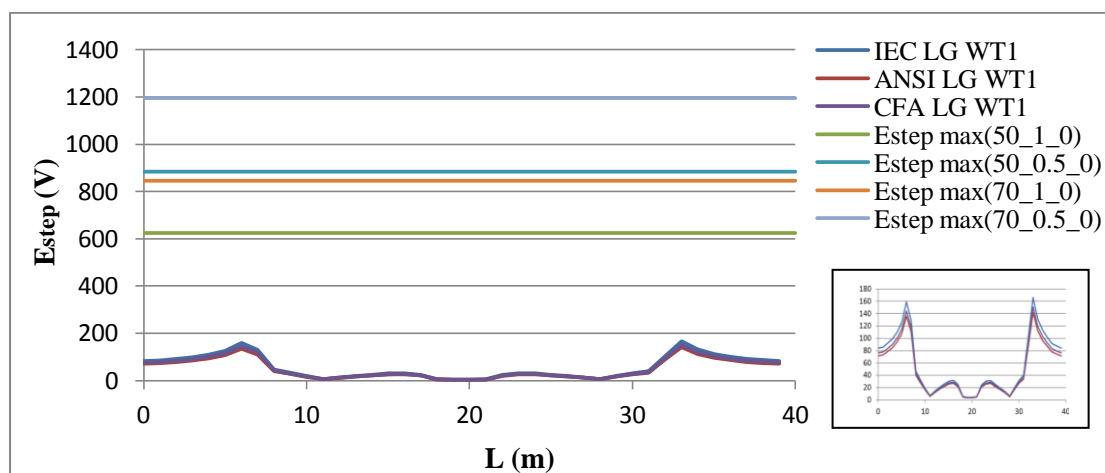
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g7} (Ω)	Z_{eq7} (Ω)	S_{f7}		
A/Γ 7	2	730,55	24175,9	101,5	6,69	0,062		
1Φ-Γη A/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	624,46	883,12	845,18	1195,26
I_{g7} (A)	51,66	44,1	46,97	E_{touch} (V)	243,12	343,82	329,04	465,34
GPR (V)	5234,57	4468,2	4759,04					

Πίνακας 8.15 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της A/Γ 7

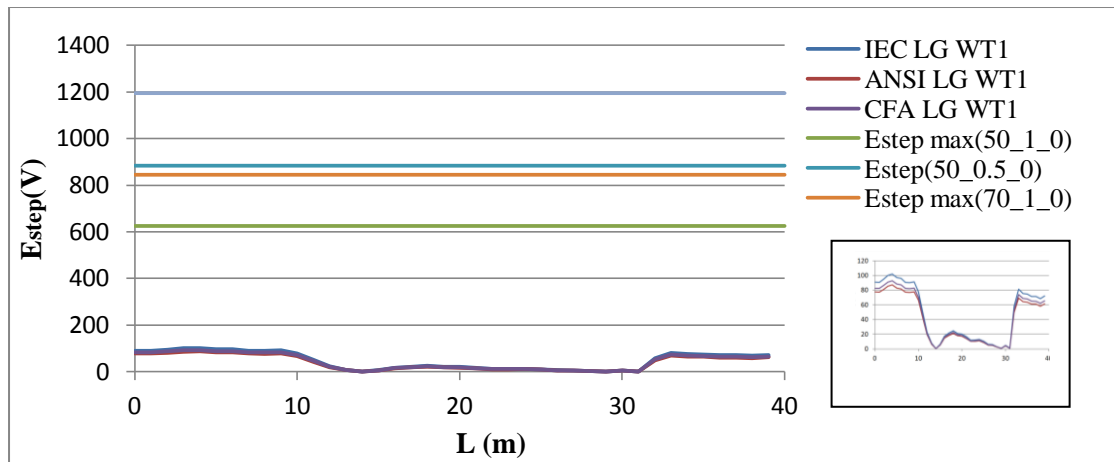
Η κατανομή των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c), (d) και (e) της A/Γ 7 ακολουθεί στα επόμενα σχήματα, για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος τήρησης αυτών.



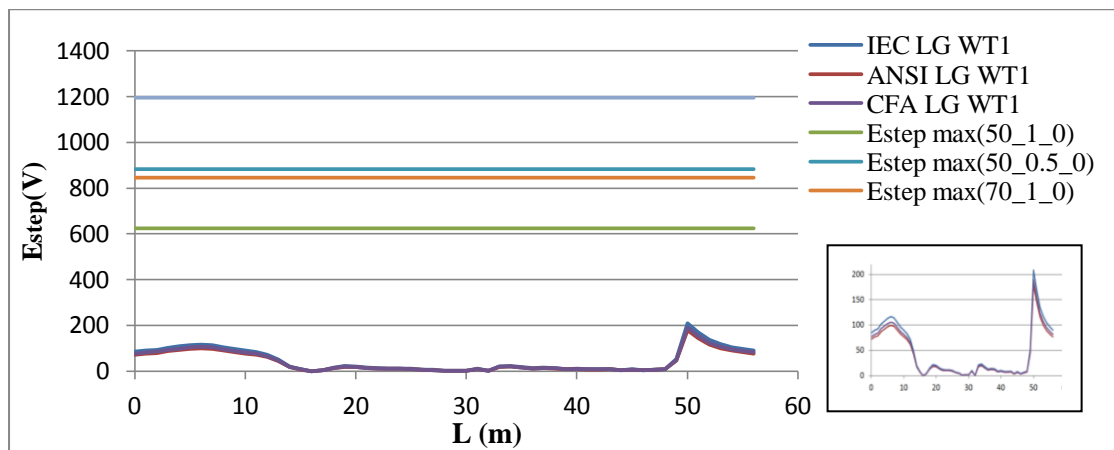
(α)



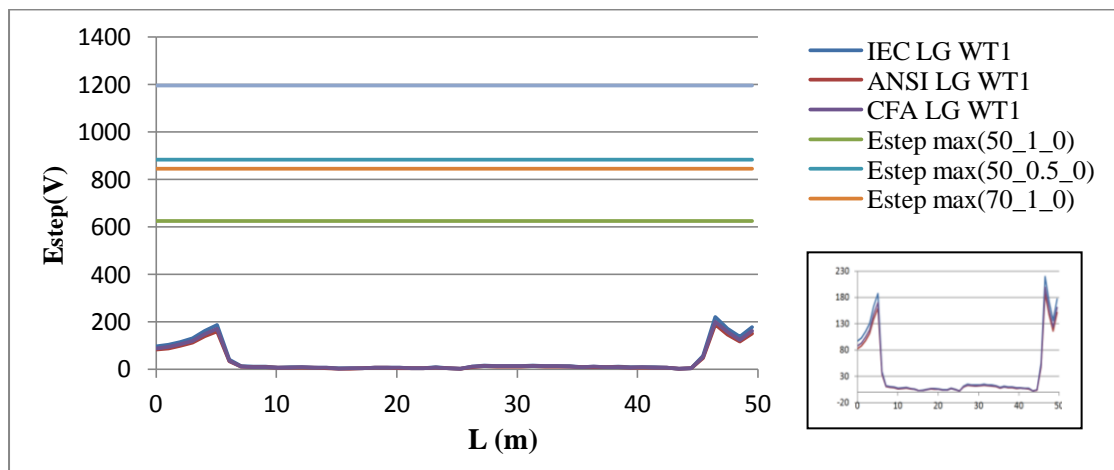
(β)



(γ)



(δ)



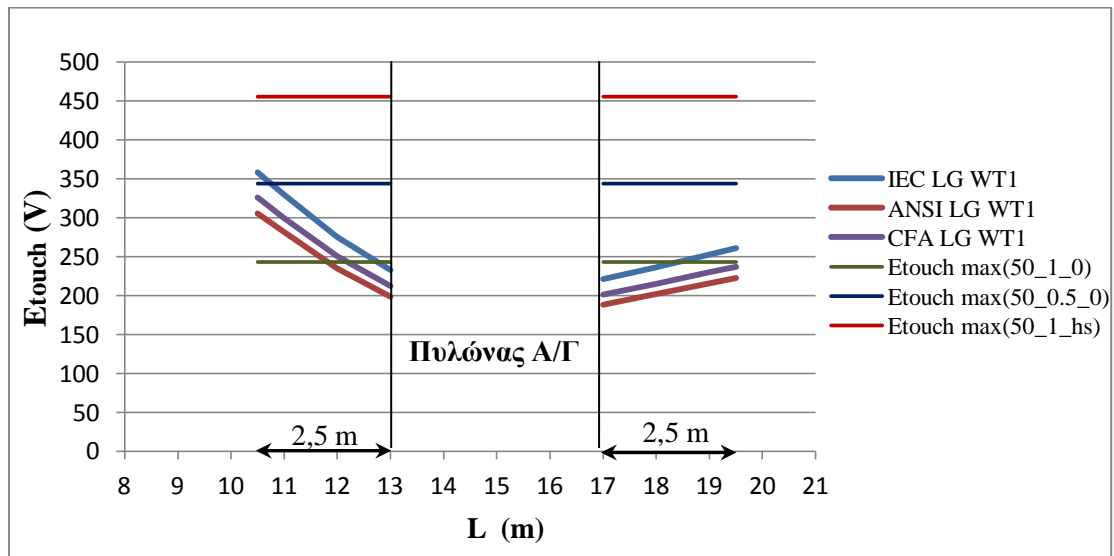
(ε)

Σχήμα 8.41 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην επιφάνεια του εδάφους της Α/Γ 7 με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA)

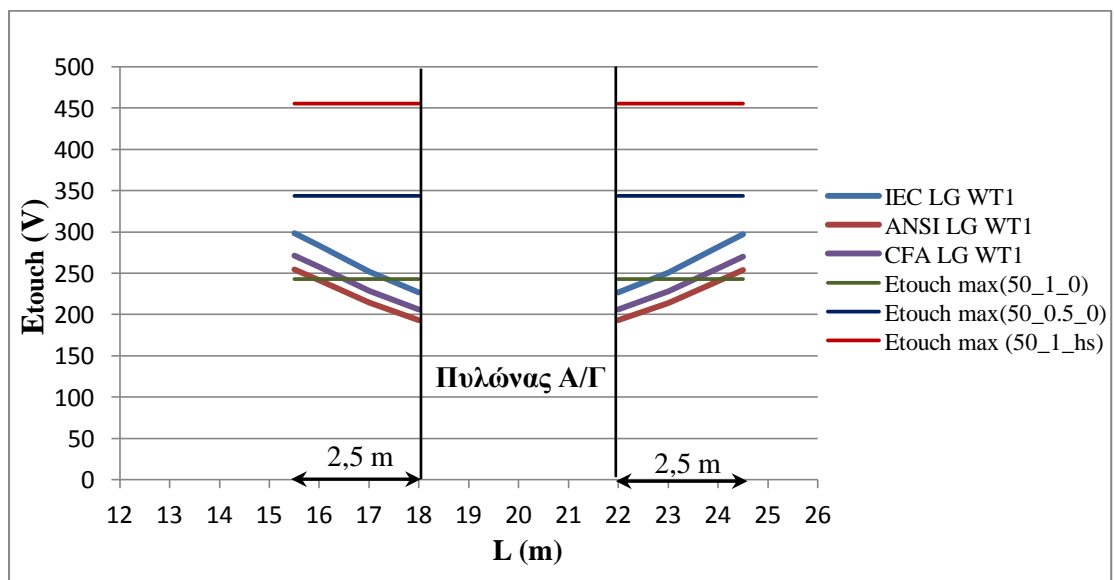
(α) κατά μήκος του άξονα (α) , (β) κατά μήκος του άξονα (β) , (γ) κατά μήκος του άξονα (c) , (δ) κατά μήκος του άξονα (d) , (ε) κατά μήκος του άξονα (e)

Από το σχήμα 8.41 παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην επιφάνεια του εδάφους της Α/Γ 7 κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c), (d) και (e) είναι εντός ορίων ($< 624,46\text{V}$) και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA). Συνεπώς, το σύστημα γείωσης της Α/Γ 7 κρίνεται ασφαλές, ως προς τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος.

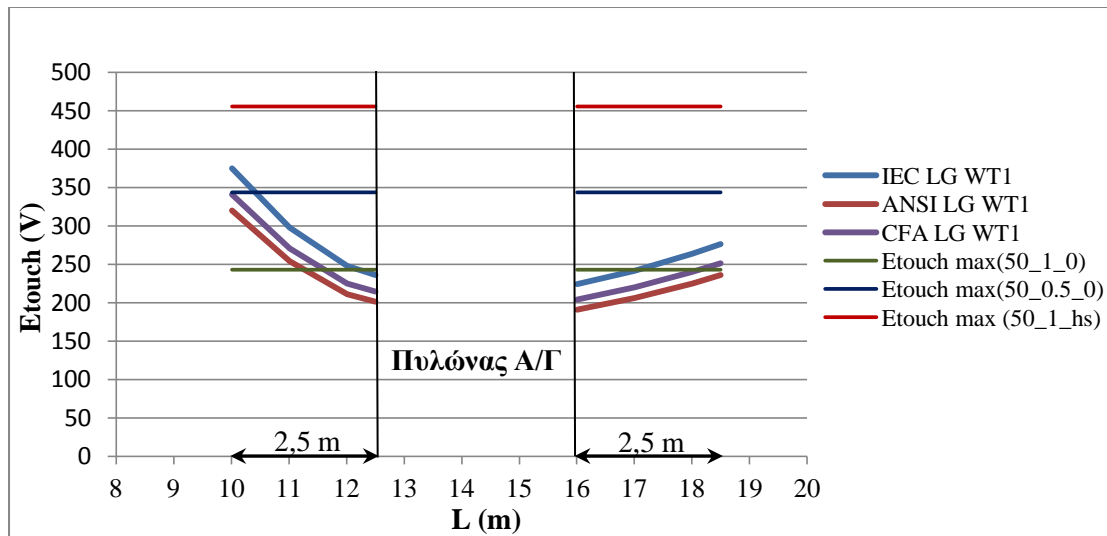
Στο σχήμα 8.42 που ακολουθεί, έχουν υπολογιστεί οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c) και (d) σε απόσταση μέχρι 2.5 m από τον πυλώνα της Α/Γ7. Επειδή κατά μήκος του άξονα (e) η απόσταση από τον πυλώνα της Α/Γ είναι μεγαλύτερη από 7 m, δεν υπολογίζονται τάσεις επαφής καθώς είναι αδύνατον να αναπτυχθούν κατά μήκος αυτού.



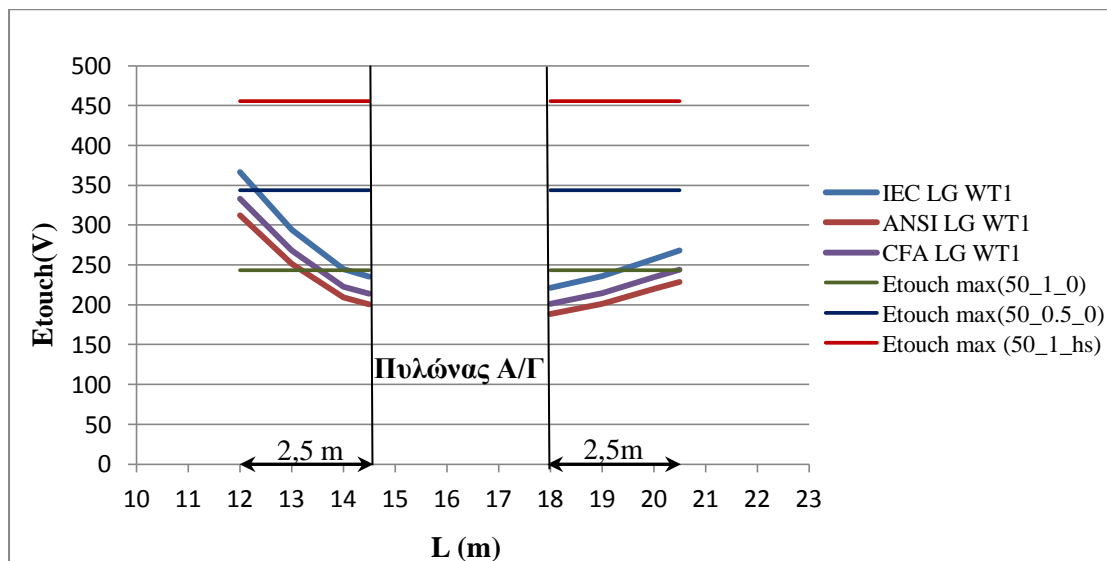
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 8.42 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση 2.5 m από τον πυλώνα της A/Γ7 με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA)

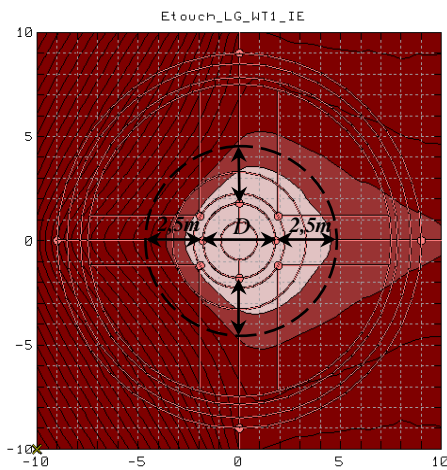
(α) κατά μήκος του άξονα (a)

(β) κατά μήκος του άξονα (b)

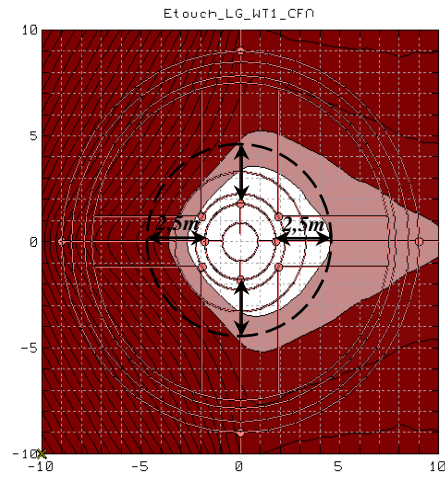
(γ) κατά μήκος του άξονα (c)

(δ) κατά μήκος του άξονα (d)

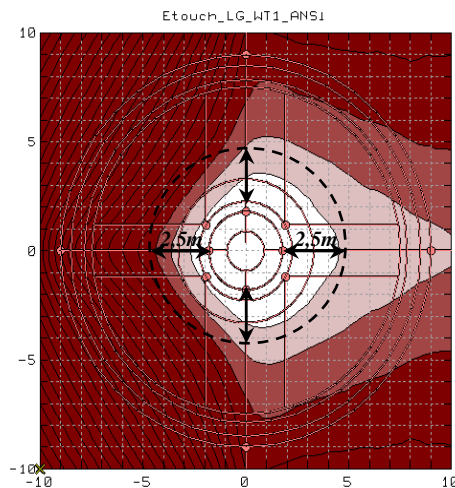
Από το σχήμα 8.42 παρατηρούμε ότι και με τρεις μεθόδους το σύστημα γείωσης της Α/Γ 7 οδηγεί σε επικίνδυνες τάσεις επαφής κατά μήκος των αξόνων (a), (b), (c) και (d), παραβιάζοντας το όριο ασφαλείας των 243,12 V αρκετά πριν τα 2.5m. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ 7 κρίνεται μη ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο επόμενο σχήμα.



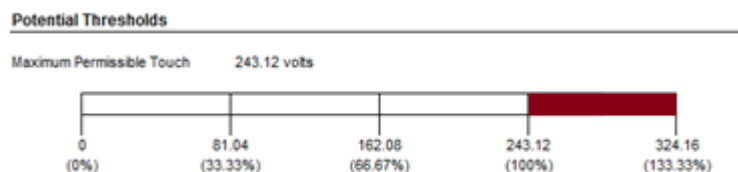
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.43 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ7, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=1\text{sec}$, $h_s=0\text{m}$

Για την αντιμετώπιση των επικίνδυνων τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται σε απόσταση μικρότερη των 2,5 m από τον πυλώνα της Α/Γ7, οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις είναι οι εξής :

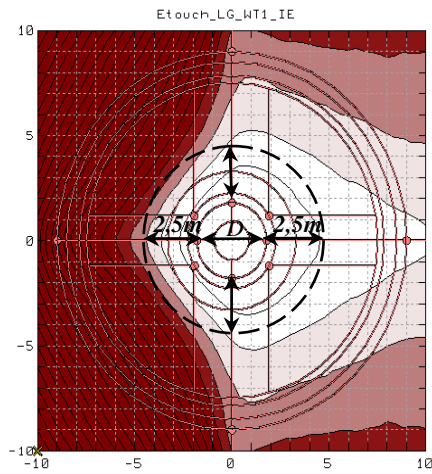
1. Κατάλληλη ρύθμιση του εξοπλισμού προστασίας, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος να μειωθεί στο 0,5sec.
2. Επίστρωση του εδάφους με υλικό επιφανείας (χαλίκι) πάχους 10cm και ειδικής αντίστασης 2500 Ωm.

Με τους δύο αυτούς τρόπους επιτυγχάνεται η αύξηση των ορίων για τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.16 που ακολουθεί ή γραφικά στο σχήμα 8.42.

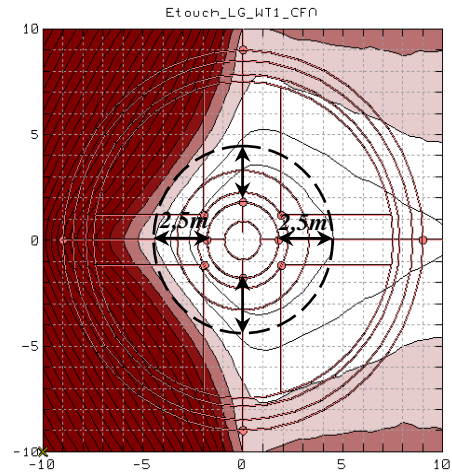
B=50kg	1 sec		0.5 sec	
Υλικό Επιφανείας	Estep[V]	Etouch[V]	Estep[V]	Etouch[V]
-----	624,46	243,12	883,12	343,82
Χαλίκι	1473,88	455,45	2084,27	644,1

Πίνακας 8.16 Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές βηματικής τάσης και τάσης επαφής για το έδαφος της Α/Γ7

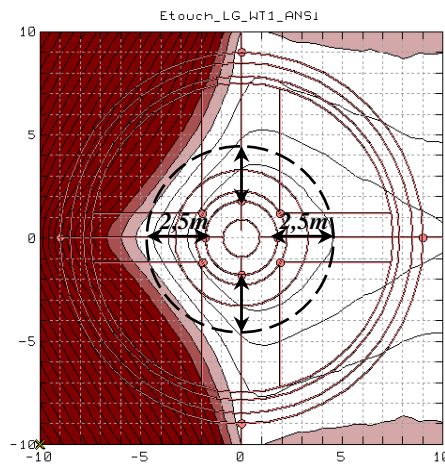
- Η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος (t_f) από 1 sec στο 0.5 sec οδηγεί σε αύξηση του ορίου ασφαλείας για τις τάσεις επαφής στα 343,82 V. Από το σχήμα 8.42 παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI και την μέθοδο CFA το σύστημα γείωσης της Α/Γ7 δίνει ασφαλείς τάσεις επαφής σε απόσταση 2,5m από τον πυλώνα κατά μήκος των αξόνων (a) - (d). Σύμφωνα όμως, με το Πρότυπο IEC στο σύστημα γείωσης της Α/Γ7 αναπτύσσονται επικίνδυνες τάσεις επαφής, σε απόσταση μικρότερη των 2,5m από τον πυλώνα, κατά μήκος των αξόνων (a), (c) και (d). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Πρότυπο IEC δίνει περίπου 17% μεγαλύτερες τιμές για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε σχέση με το Πρότυπο ANSI ενώ η μέθοδος CFA συνεπάγεται αύξηση τάσεων περίπου 6,5% , για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ1. Συνεπώς, παρά την μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος το σύστημα γείωσης της Α/Γ 7 κρίνεται, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC, μη ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής (βλ.σχήμα 8.44), με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η προσθήκη υλικού επιφανείας.



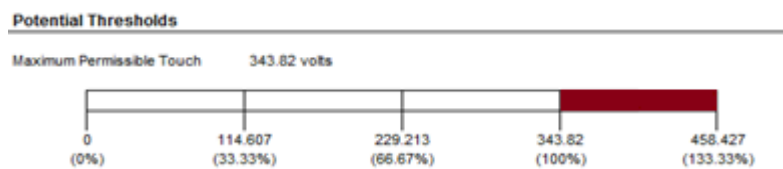
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



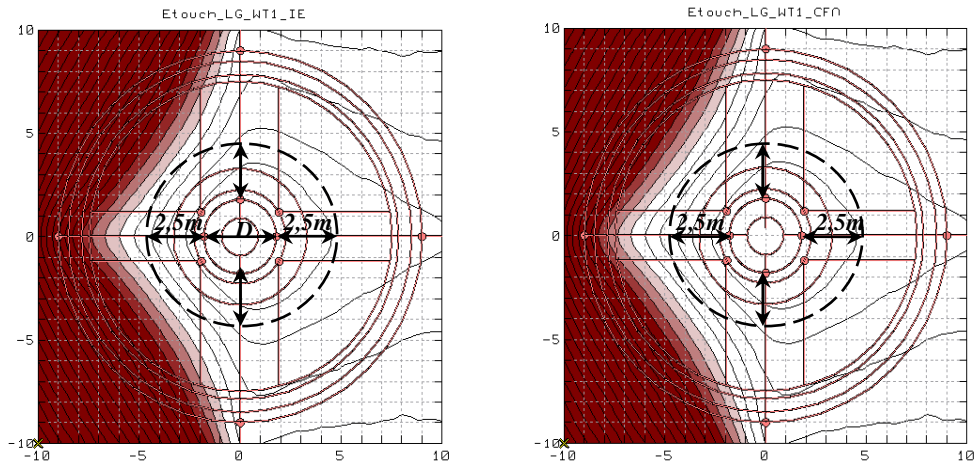
γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.44 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ7, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f=0.5\text{sec}$, $h_s=0\text{ m}$

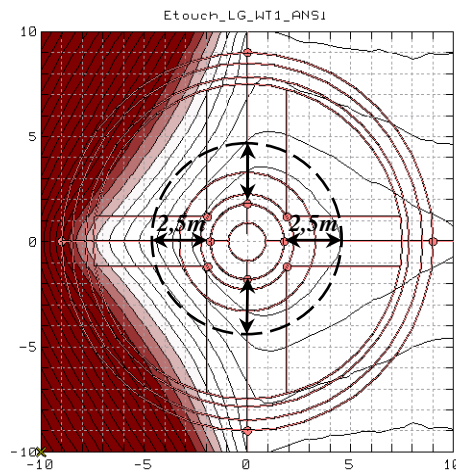
- Με την προσθήκη υλικού επιφανείας (χαλίκι), στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης της Α/Γ 7, επιτυγχάνεται ακόμη μεγαλύτερη αύξηση του ορίου ασφαλείας για τις τάσεις επαφής ($E_{\text{touch max}} = 455,45\text{V}$). Από το σχήμα 8.42 παρατηρούμε ότι με προσθήκη υλικού επιφανείας και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), το σύστημα γείωσης της Α/Γ7 δίνει ασφαλείς τάσεις επαφής σε απόσταση 2,5m από τον πυλώνα κατά μήκος

κάθε άξονα, (a)-(d). Τελικά, μετά την προσθήκη υλικού επιφανείας (χαλίκι) το σύστημα γείωσης της A/Γ7 καθίσταται απόλυτα ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα που ακολουθεί.

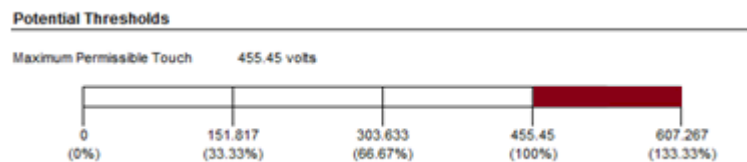


α) IEC 60909

β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.45 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της A/Γ7, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $\{h_s = 10\text{ cm} , \rho_s = 2500\ \Omega\text{m}\}$

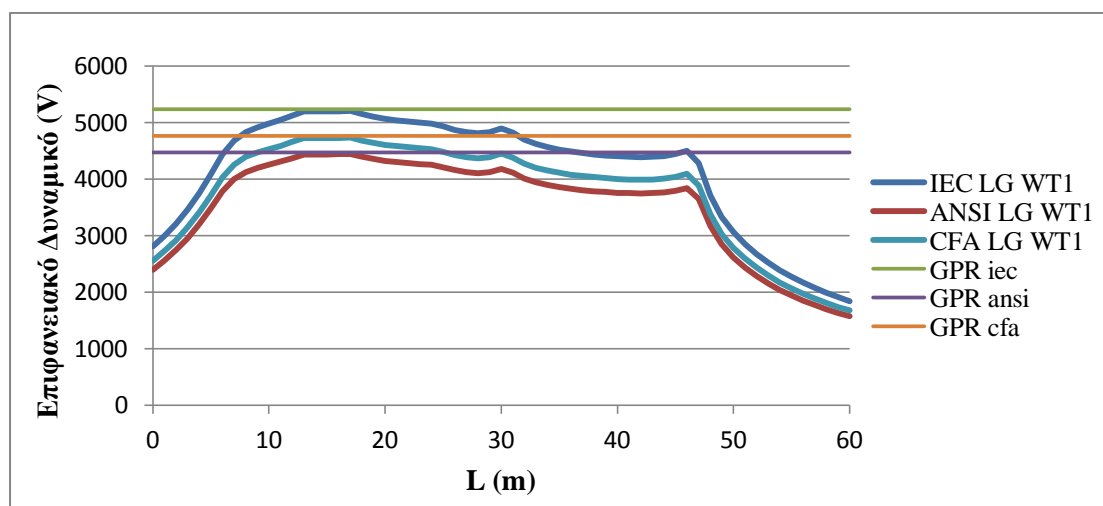
8.5.2.8 Απόκριση Συστήματος Γείωσης A/Γ 8

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της A/Γ8 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

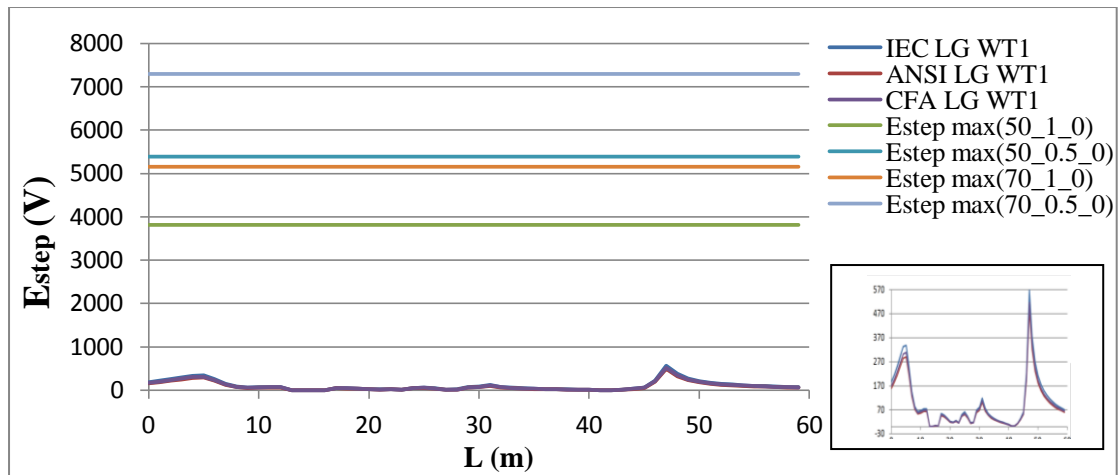
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g8} (Ω)	Z_{eq8} (Ω)	S_{f8}		
A/Γ 8	100	5310,44	5310,44	79,2	6,82	0,079		
1Φ-Γη A/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	3812,07	5391,08	5159,43	7296,54
I_{g8} (A)	65,83	56,19	59,85	E_{touch} (V)	1040,02	1470,81	1407,61	1990,66
GPR (V)	5234,62	4468,24	4759,08					

Πίνακας 8.17 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της A/Γ8

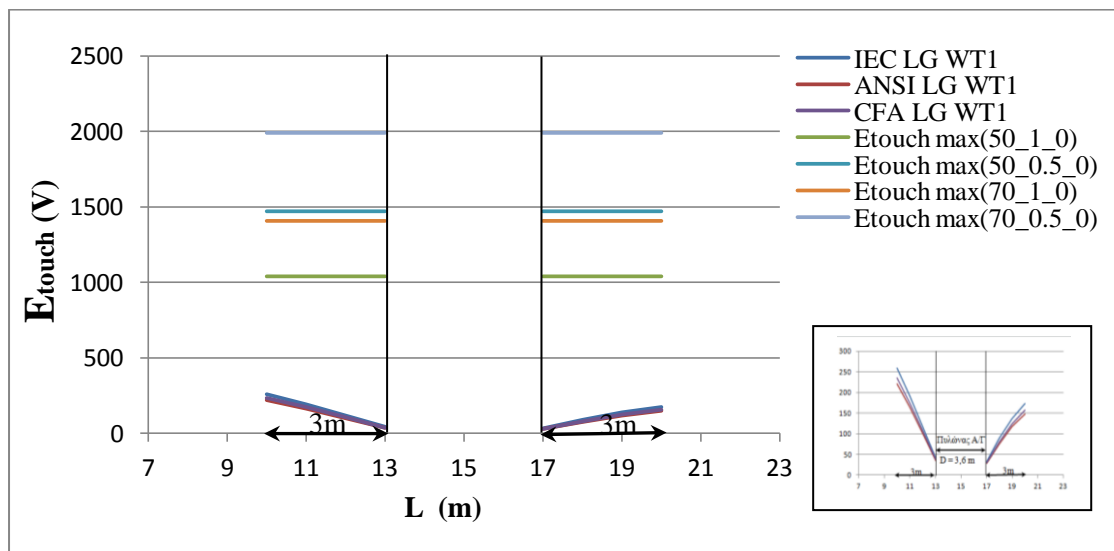
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 8 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/ CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.46 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της A/Γ 8 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

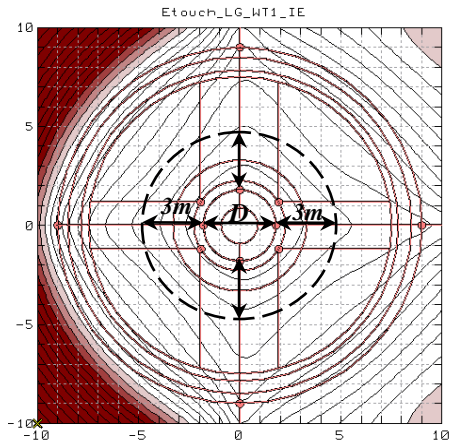


Σχήμα 8.47 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 8 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

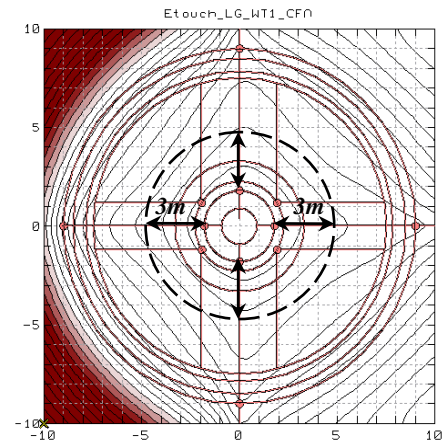


Σχήμα 8.48 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 8 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

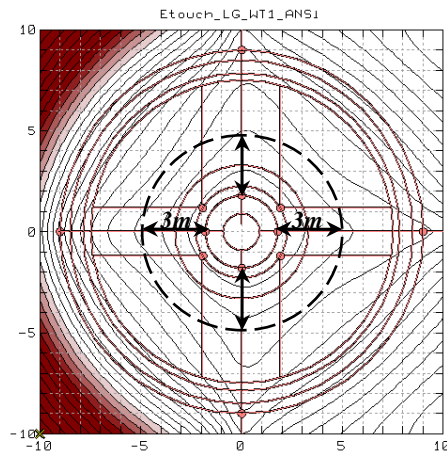
Από τα σχήματα (8.47) και (8.48) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 8 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 8, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).



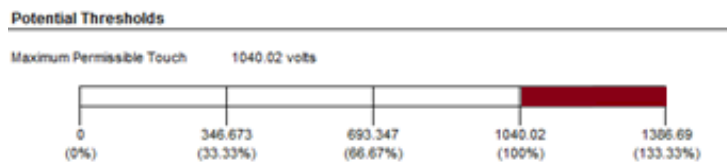
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.49 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ8, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $h_s = 0\text{ m}$

Στο σχήμα 8.49 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 1040,02 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ8. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ8 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

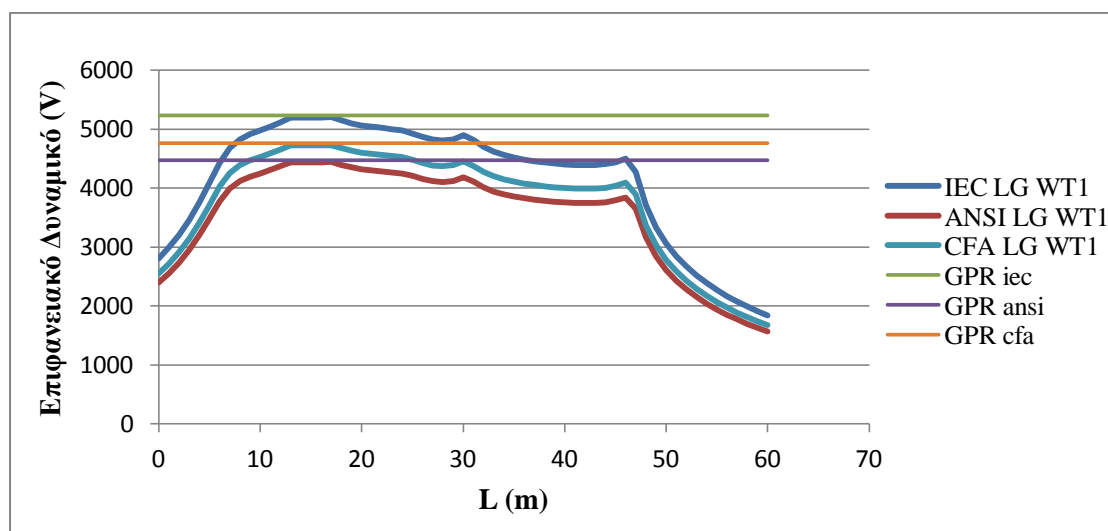
8.5.2.9 Απόκριση Συστήματος Γείωσης Α/Γ 9

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης της Α/Γ 9 συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

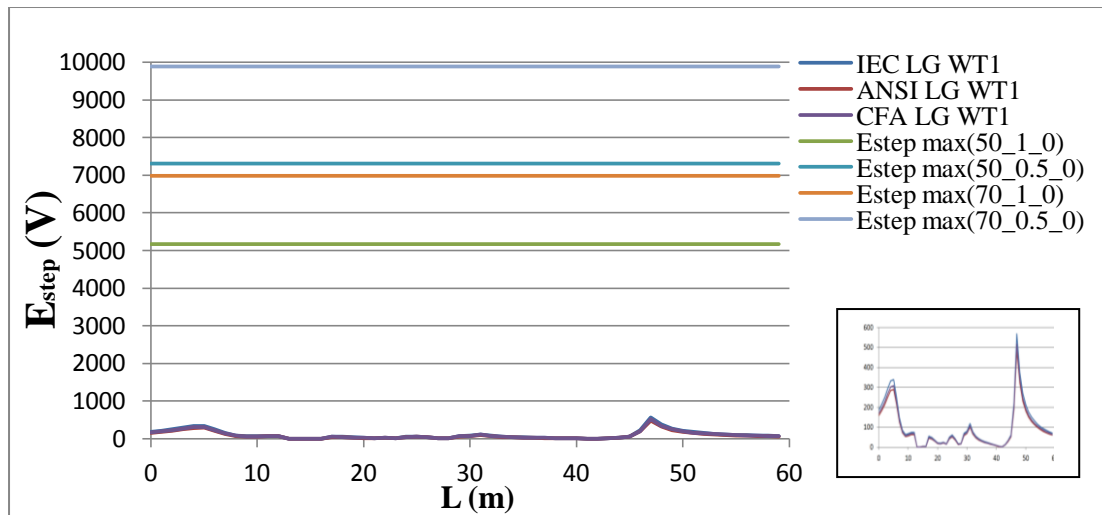
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	R_{g9} (Ω)	Z_{eq9} (Ω)	S_{f9}		
Α/Γ 9	100	7254,68	7254,68	108,2	6,67	0,058		
1Φ-Γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	E_{step} (V)	5165,26	7304,78	6990,91	9886,64
I_{g9} (A)	48,33	41,26	43,94	E_{touch} (V)	1378,31	1949,23	1865,48	2638,18
GPR (V)	5234,58	4468,2	4759,05					

Πίνακας 8.18 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης της Α/Γ 9

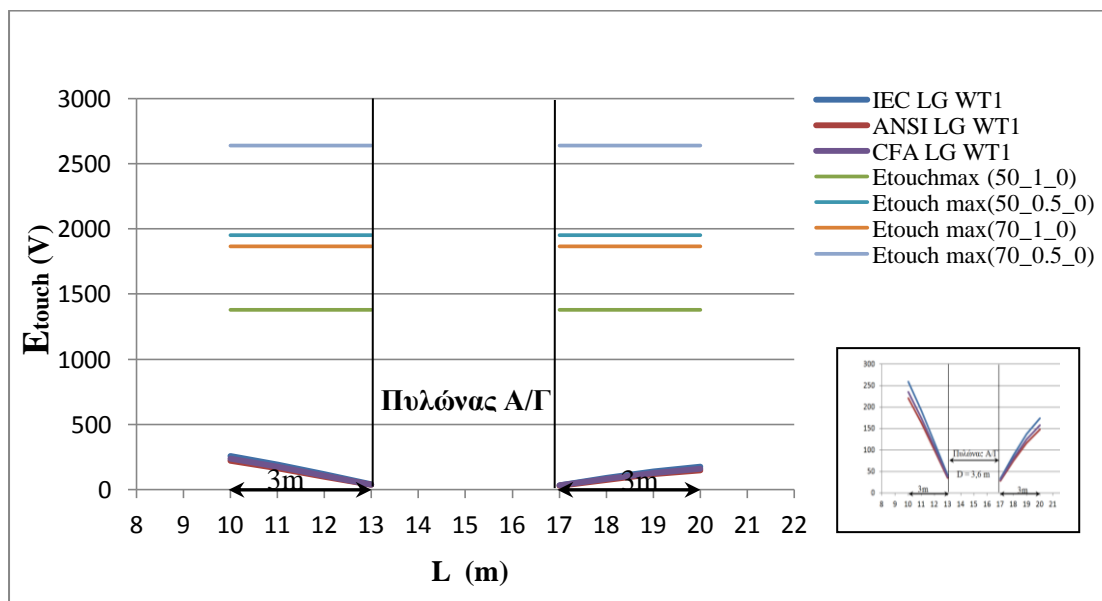
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται το επιφανειακό δυναμικό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 9 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τον έλεγχο τήρησης αυτών.



Σχήμα 8.50 Επιφανειακό δυναμικό κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 9 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

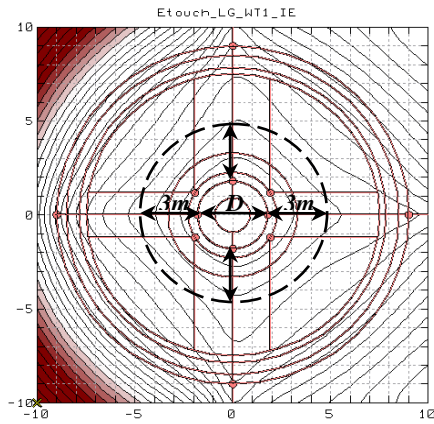


Σχήμα 8.51 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 9 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

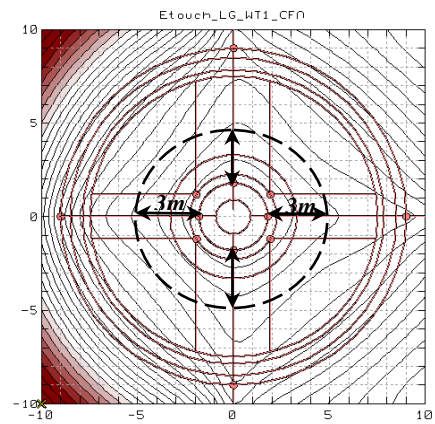


Σχήμα 8.52 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 9 για τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος

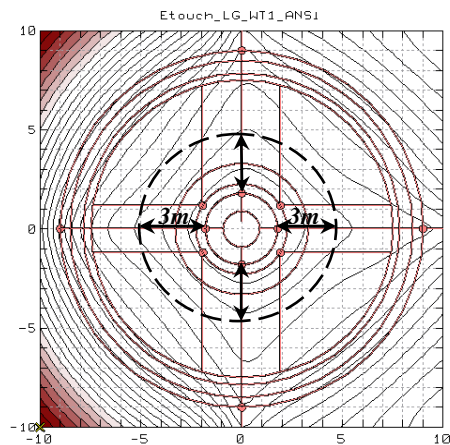
Από τα σχήματα (8.51) και (8.52) προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος του άξονα (a) της Α/Γ 9 είναι εντός επιτρεπτών ορίων και με τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Επιπλέον, οι τρεις τρόποι υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος ικανοποιούν τα όρια ασφαλείας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) κατά μήκος των αξόνων b, c, d και e. Στην συνέχεια παραθέτουμε το επιφανειακό ανάπτυγμα των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ 9, για τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, CFA).



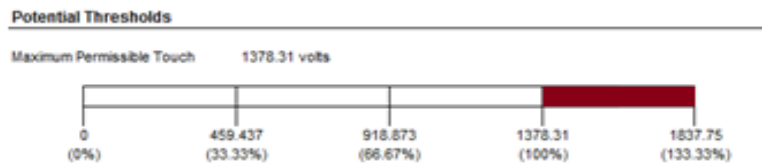
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.53 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός περιμέτρου ακτίνας 4.8 m, από το κέντρο του πυλώνα της Α/Γ9, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA) και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $h_s = 0\text{ m}$

Στο σχήμα 8.53 φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των 3 μεθόδων ως προς την τήρηση του ορίου ασφαλείας των 1378,31 V, από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε απόσταση έως 3m από τον πυλώνα της Α/Γ9. Επομένως, το σύστημα γείωσης της Α/Γ9 κρίνεται ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), χωρίς να απαιτείται λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, προσθήκη υλικού επιφανείας).

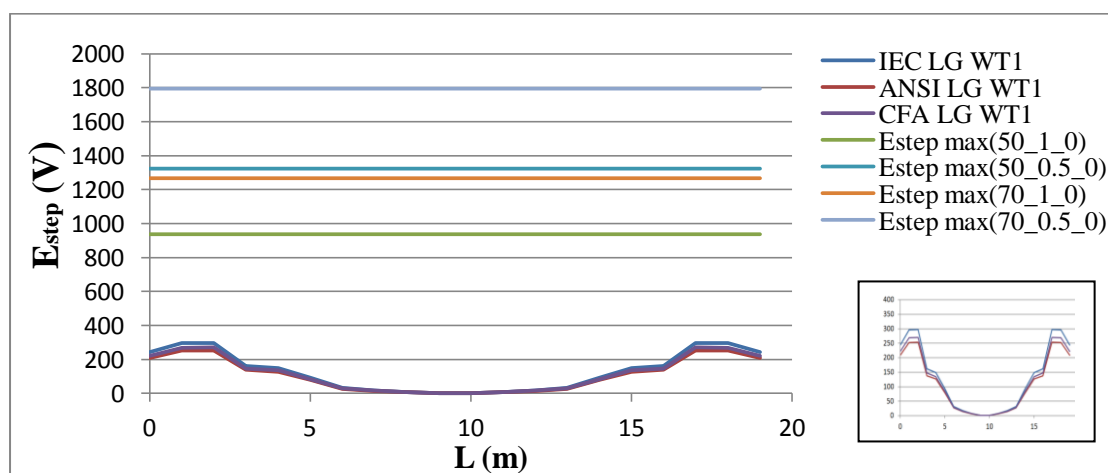
8.5.2.10 Απόκριση Συστήματος Γείωσης του Κέντρου Ελέγχου

Οι ηλεκτρικές παράμετροι γείωσης του Κέντρου Ελέγχου συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

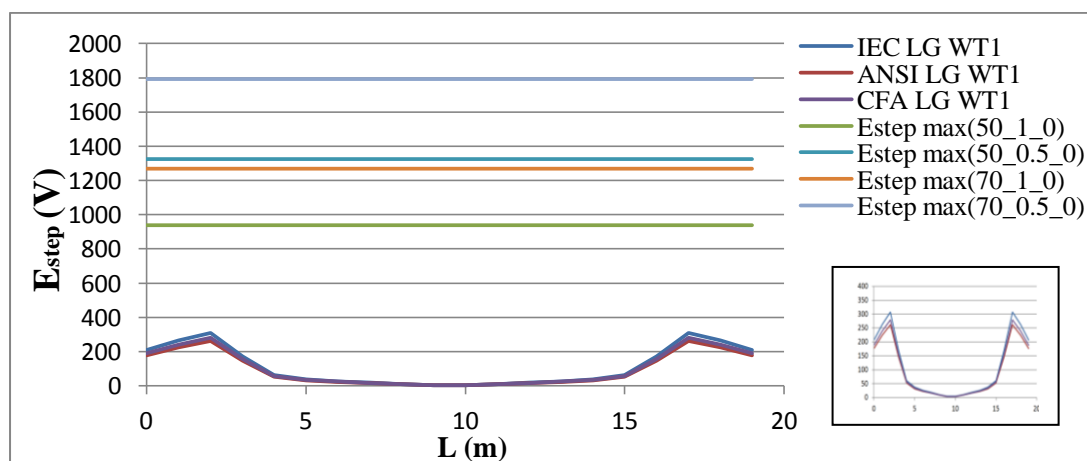
Έδαφος	h_1 (m)	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	$R_{g\ c/c}$ (Ω)	$Z_{eq\ c/c}$ (Ω)	$S_{f\ c/c}$		
K/E	4,52	1179,4	11290,1	105,6	6,68	0,059485		
1Φ-Γη Α/Γ1	IEC	ANSI	CFA	Όρια Ασφαλείας	50_1_0	50_0.5_0	70_1_0	70_0.5_0
I_f (kA)	0,8333	0,7113	0,7576	$E_{step}(V)$	936,86	1324,92	1267,99	1793,22
$I_{g\ c/c}$ (A)	49,17	41,97	44,7	$E_{touch}(V)$	321,22	454,27	434,75	614,83
GPR (V)	5234,61	4468,23	4759,08					

Πίνακας 8.19 Ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος γείωσης του Κέντρου Ελέγχου

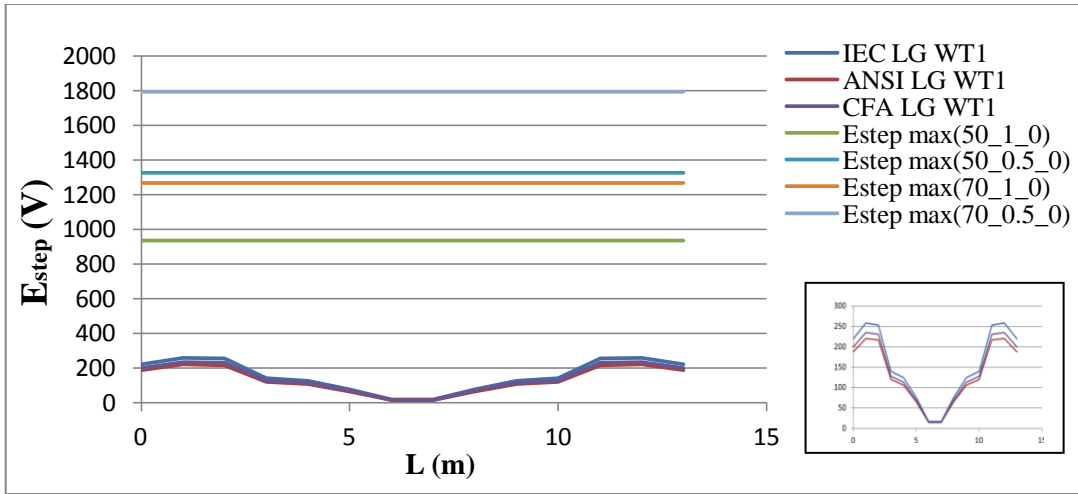
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους του Κέντρου Ελέγχου, κατά μήκος των αξόνων (a) – (f).



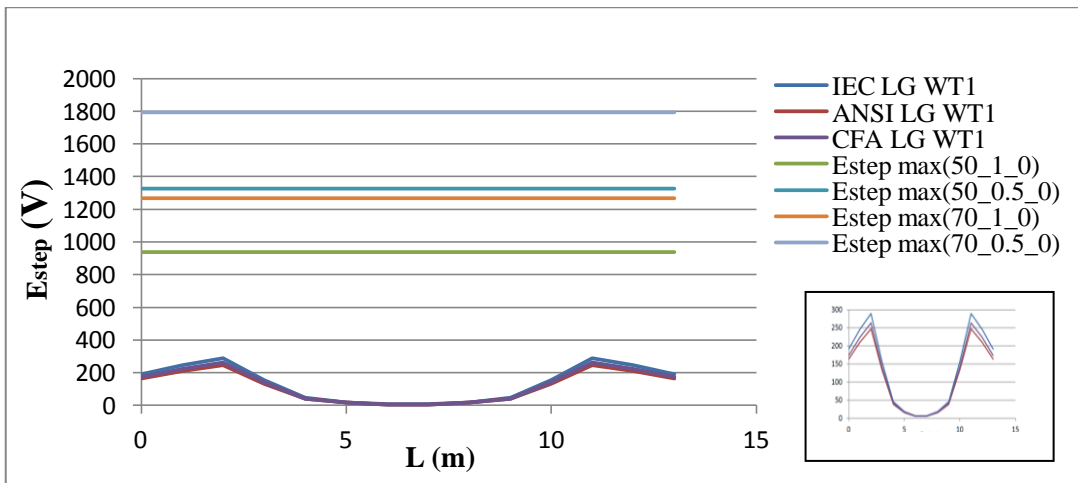
(α)



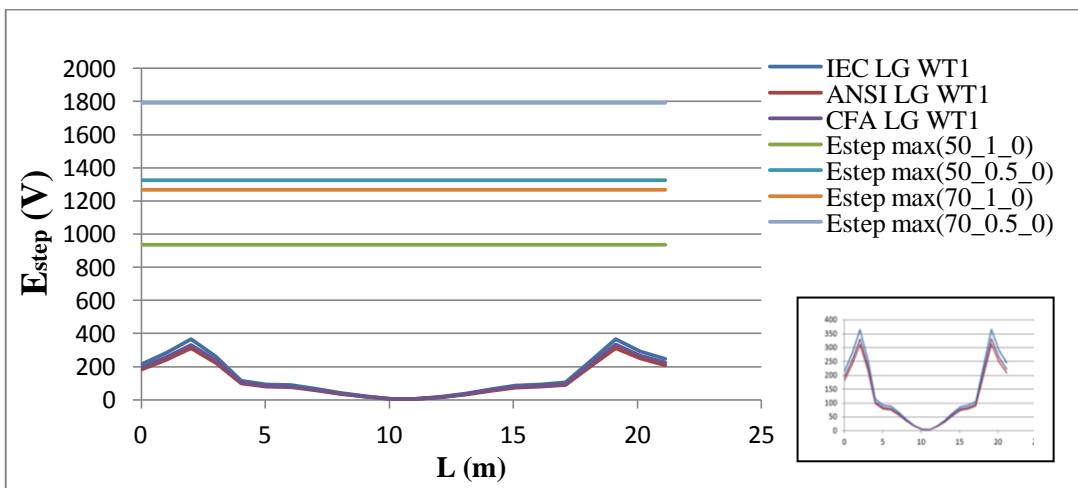
(β)



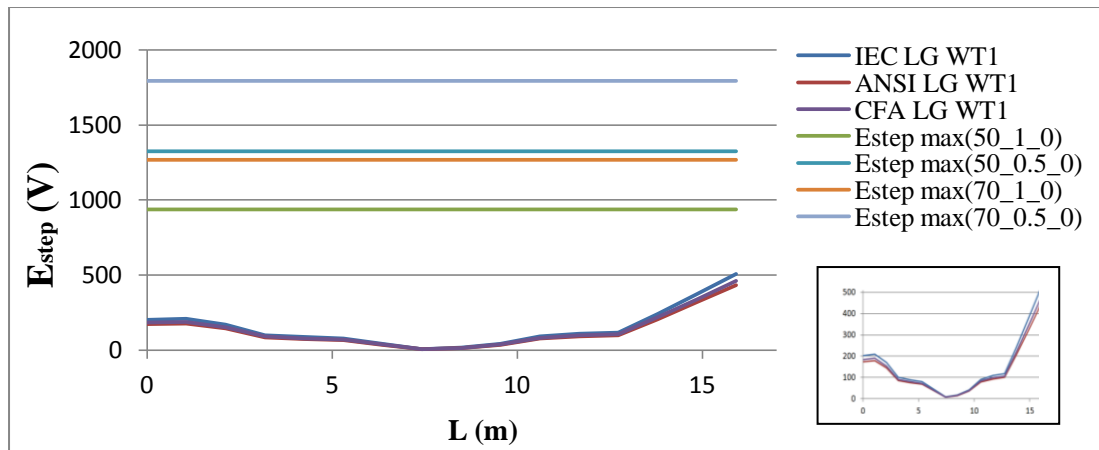
(γ)



(δ)



(ε)



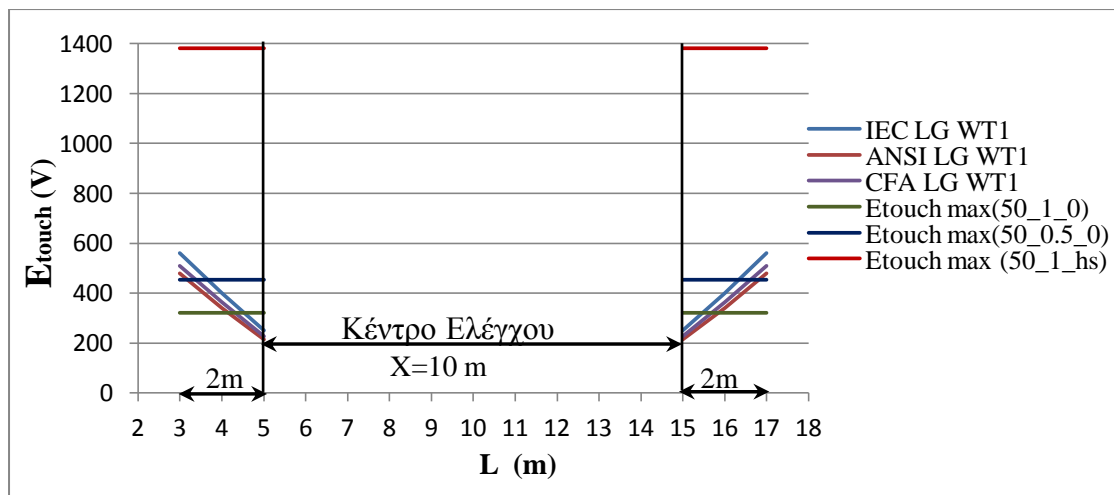
(στ)

Σχήμα 8.54 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην επιφάνεια του εδάφους του Κέντρου Ελέγχου με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA)

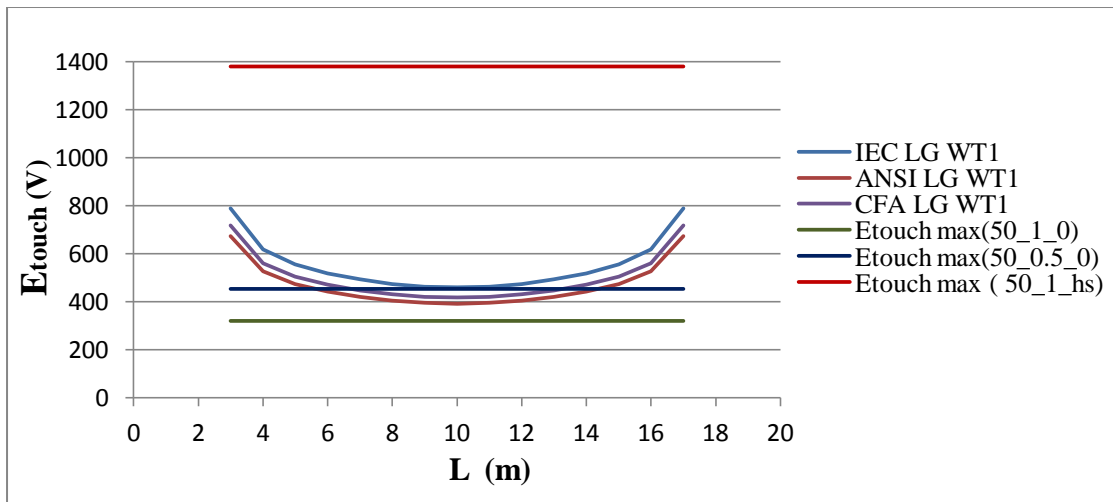
- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| (α) κατά μήκος του άξονα (a) | (δ) κατά μήκος του άξονα (d) |
| (β) κατά μήκος του άξονα (b) | (ε) κατά μήκος του άξονα (e) |
| (γ) κατά μήκος του άξονα (c) | (στ) κατά μήκος του άξονα (f) |

Παρατηρούμε από το σχήμα 8.54 ότι, το σύστημα γείωσης του Κ/Ε δίνει και με τις τρεις μεθόδους ασφαλείς βηματικές τάσεις κατά μήκος των αξόνων (a) – (f). Επομένως, το σύστημα γείωσης του Κ/Ε κρίνεται ασφαλές ως προς τις βηματικές τάσεις και με τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA).

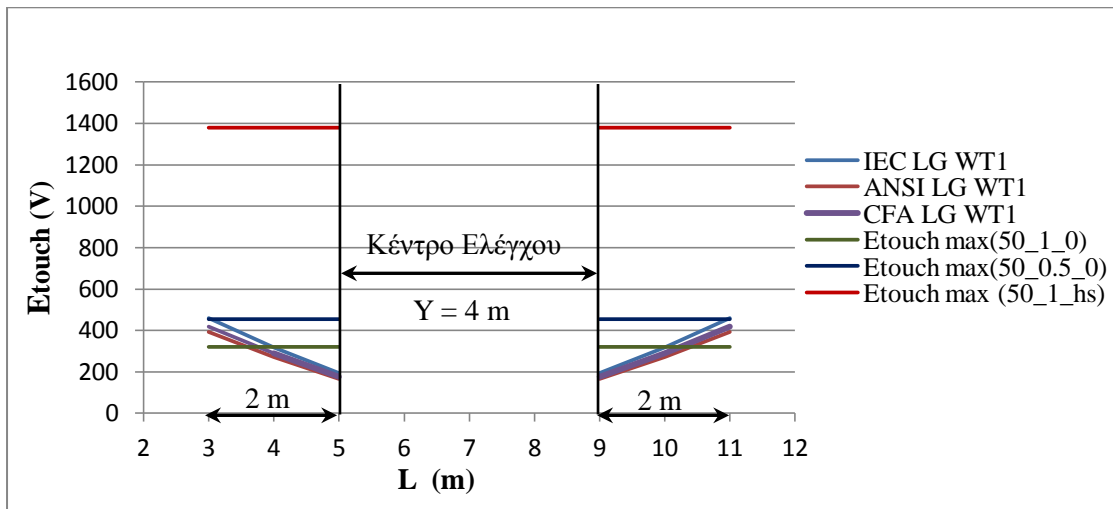
Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, κατά μήκος των αξόνων (a) - (f).



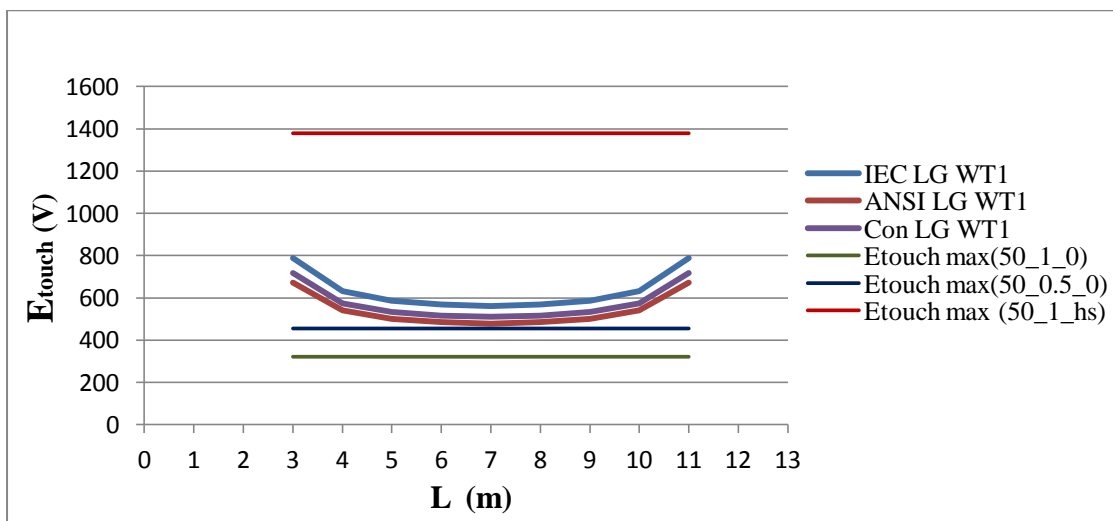
(α)



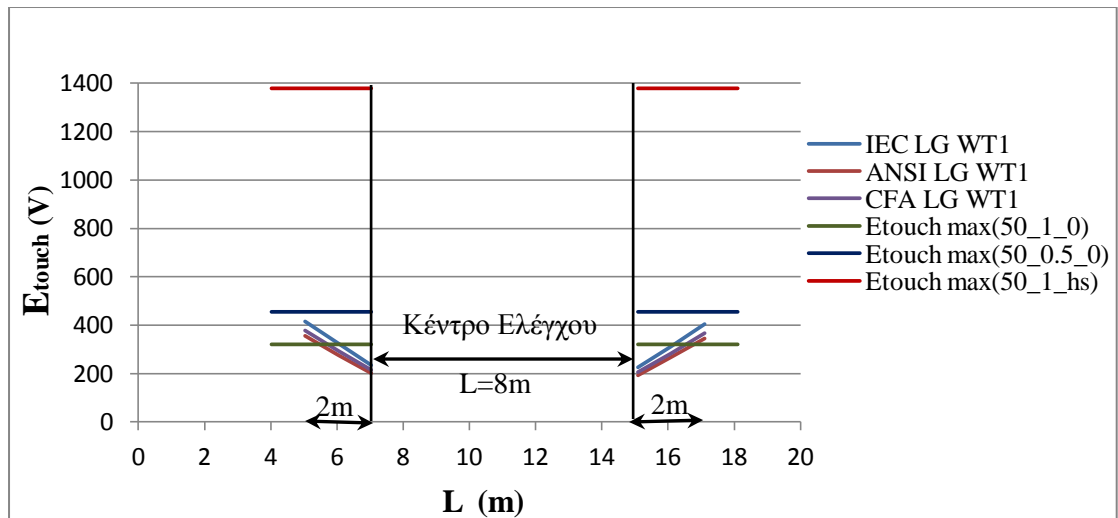
(β)



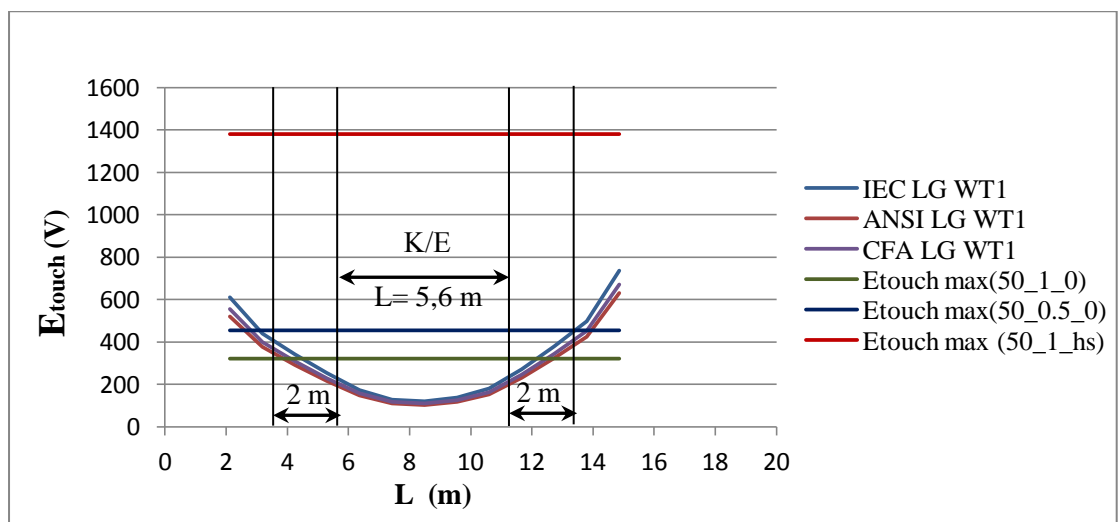
(γ)



(δ)



(ε)

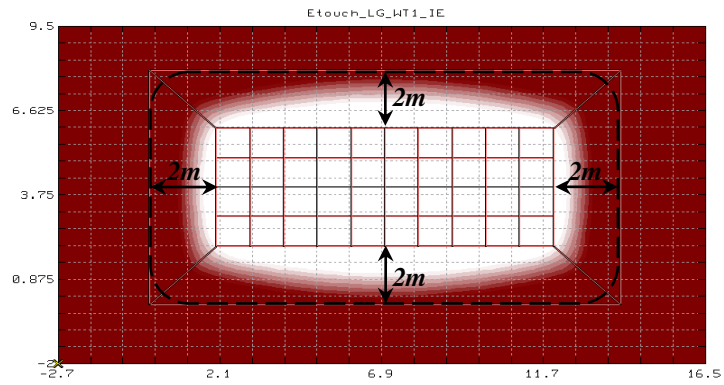


(στ)

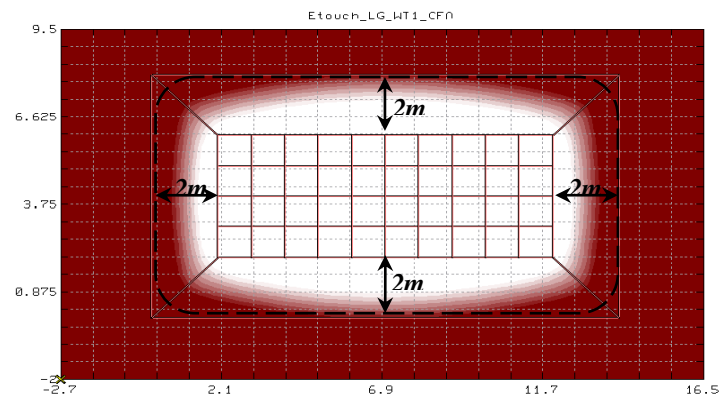
Σχήμα 8.55 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ANSI/CFA), σε απόσταση 2 m από το K/E

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| (α) κατά μήκος του άξονα (a) | (δ) κατά μήκος του άξονα (d) |
| (β) κατά μήκος του άξονα (b) | (ε) κατά μήκος του άξονα (e) |
| (γ) κατά μήκος του άξονα (c) | (στ) κατά μήκος του άξονα (f) |

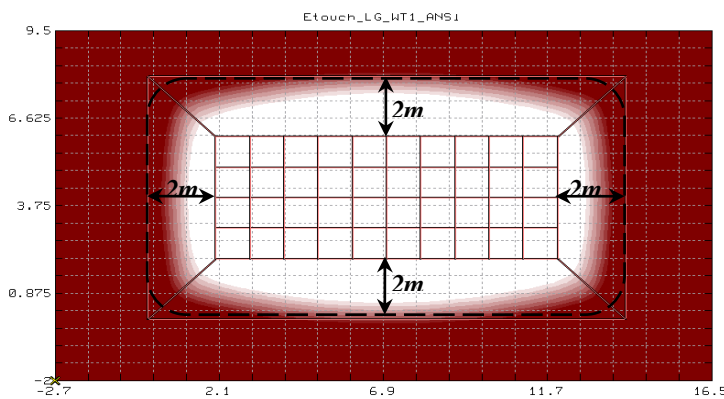
Με βάση το σχήμα 8.55 παρατηρούμε ότι το σύστημα γείωσης του K/E δίνει επικίνδυνες τάσεις επαφής ($> 321,22V$) σε κάθε άξονα (a,c,e,f), σε απόσταση μικρότερη των 2m από το κτίριο του K/E, και για τις τρεις μεθόδους (IEC/ANSI/CFA). Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται χαρακτηριστικά η συμφωνία των τριών μεθόδων ως προς την παραβίαση του ορίου ασφαλείας των 321,22 V από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, σε απόσταση μικρότερη των 2m από το K/E.



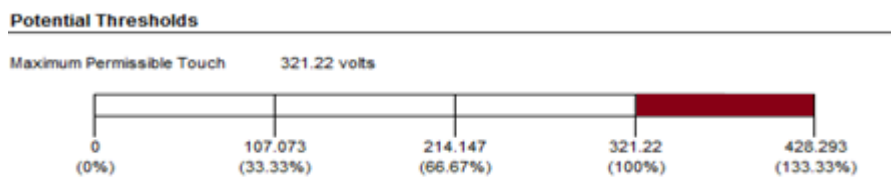
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis



γ) ANSI C 37.010



Σχήμα 8.56 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από το K/E, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος και συνθήκες ασφαλείας $b = 50 \text{ kg}$, $t_f = 1 \text{ sec}$, $h_s = 0 \text{ m}$

Επομένως, το σύστημα γείωσης του Κ/Ε κρίνεται μη ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους. Για την αντιμετώπιση λοιπόν, των επικίνδυνων τάσεων επαφής που αναπτύσσονται σε απόσταση μικρότερη των 2m από το Κ/Ε, οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις είναι οι εξής :

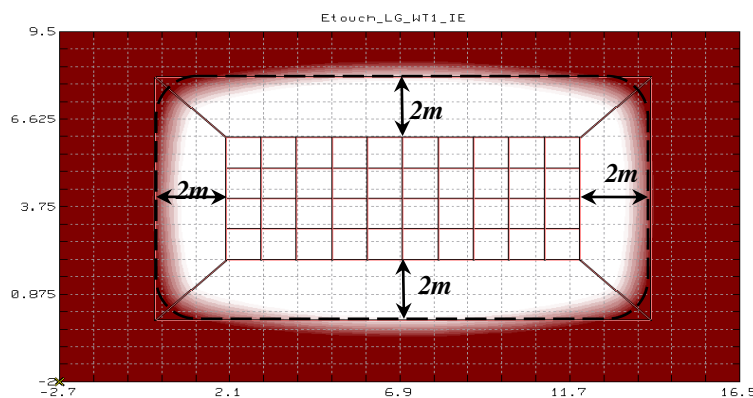
1. Κατάλληλη ρύθμιση του εξοπλισμού προστασίας, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος να μειωθεί στο 0,5sec.
2. Επίστρωση του εδάφους με υλικό επιφανείας (άσφαλτος) πάχους 10 cm και ειδικής αντίστασης 10000 Ωm.

Με τους δύο αυτούς τρόπους επιτυγχάνεται η αύξηση των ορίων για τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.20 που ακολουθεί ή γραφικά στο σχήμα 8.55.

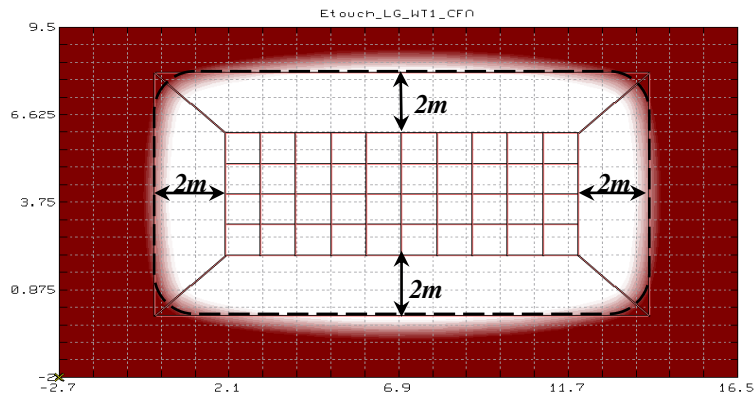
B=50kg	1 sec		0.5 sec	
Υλικό Επιφανείας	Estep[V]	Etouch[V]	Estep[V]	Etouch[V]
-----	936,86	321,22	1324,92	454,27
Άσφαλτος	5170,75	1379,69	7312,55	1951,17

Πίνακας 8.20 Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές βηματικής τάσης και τάσης επαφής για το έδαφος του Κέντρου Ελέγχου

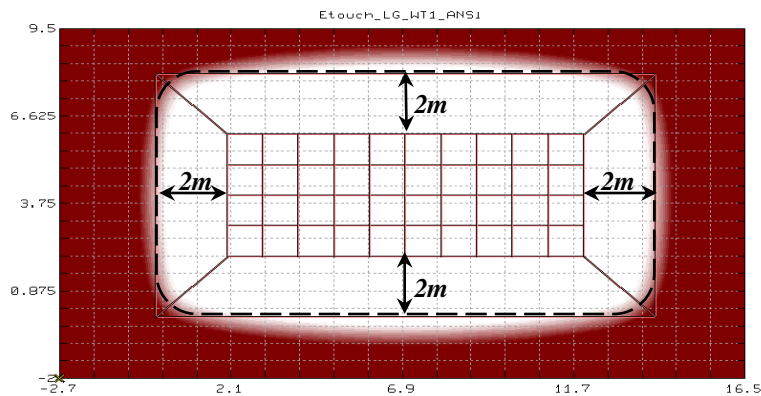
- Η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος (t_f) από 1 sec στο 0.5 sec οδηγεί σε αύξηση του ορίου ασφαλείας για τις τάσεις επαφής στα 454,27 V. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην υποχώρηση των επικίνδυνων τάσεων επαφής, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



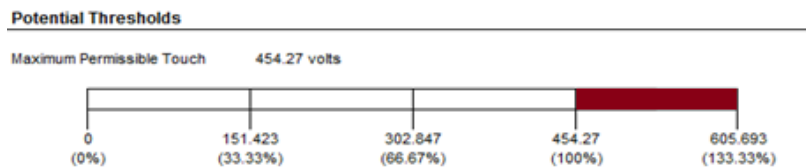
α) IEC 60909



β) Conventional Fault Analysis

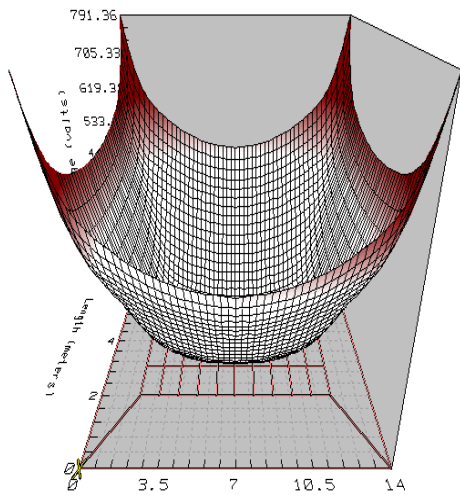


γ) ANSIC 37.010

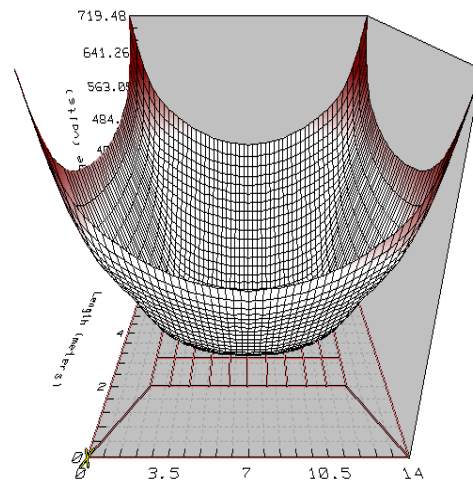


Σχήμα 8.57 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από το Κ/Ε, με τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος και συνθήκες ασφαλείας $b = 50 \text{ kg}$, $t_f = 0.5 \text{ sec}$, $h_s = 0 \text{ m}$

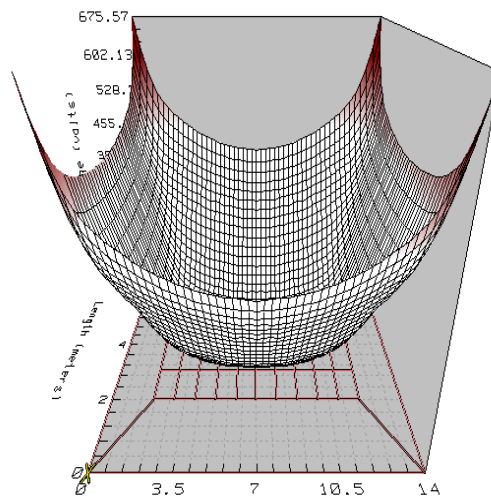
Παρατηρούμε ότι η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης δεν καθιστά απόλυτα ασφαλές το σύστημα γείωσης του Κ/Ε ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής με καμμία από τις τρεις μεθόδους. Συγκεκριμένα, και με τις τρεις μεθόδους παρατηρείται μεγιστοποίηση των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής, σε ανεπίτρεπτα επίπεδα τιμών ($> 454,27 \text{ V}$), στις άκρες της εξωτερικής περιμέτρου του πλέγματος όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.



(α)



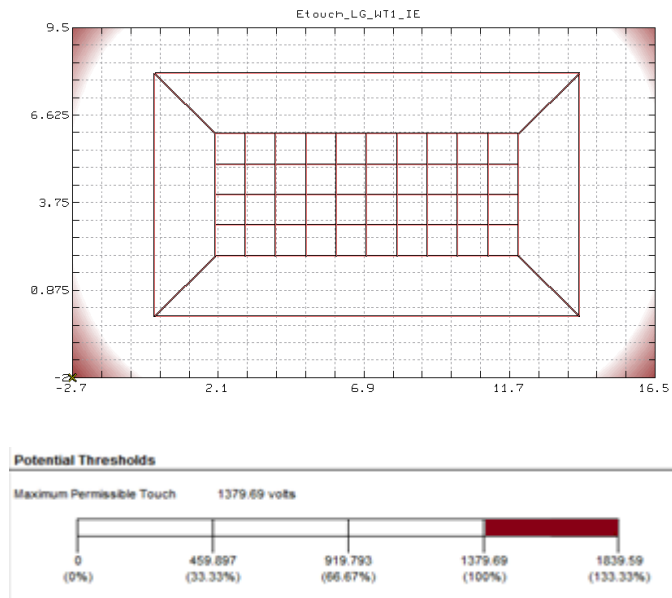
(β)



(γ)

Σχήμα 8.58 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής του K/E σύμφωνα (α) με το Πρότυπο IEC (β) με το Πρότυπο ANSI και (γ) με την μέθοδο CFA

- Η προσθήκη υλικού επιφανείας (άσφαλτος) στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης του K/E, σχεδόν τετραπλασιάζει την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επαφής ($E_{touch\ max} = 1379,69\ V$) με αποτέλεσμα το σύστημα γείωσης του K/E να καθίσταται απόλυτα ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) και με τις τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το επιφανειακό ανάπτυγμα των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής στην περιοχή του K/E, για την πιο απαισιόδοξη μέθοδο υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (Πρότυπο IEC).



Σχήμα 8.59 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην ευρύτερη περιοχή γύρω από το Κ/Ε σύμφωνα με το Πρότυπο IEC και συνθήκες ασφαλείας $b=50\text{kg}$, $t_f = 1\text{sec}$, $\{h_s = 10\text{cm}$, $\rho_s = 10.000 \Omega\text{m}\}$

Κεφάλαιο 9

Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθοδολογίας υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος σε ηλεκτρικά δίκτυα με επιλογή και περιγραφή των επικρατέστερων διεθνώς προτύπων, IEC 60909 και ANSI C 37.010. Με την περιγραφή των δύο προτύπων αναδεικνύονται και ερμηνεύονται οι αντίστοιχες, απλουστευτικού χαρακτήρα, παραδοχές αυτών και αντιπαραβάλλονται οι διάφοροι τύποι ρεύματος μεταξύ των δύο προτύπων. Στην συνέχεια, προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός υπαρκτού αιολικού πάρκου υπό συνθήκες ασύμμετρων σφαλμάτων, με χρήση του λογισμικού πακέτου PSAF, σύμφωνα με τις μεθόδους IEC, ANSI και CFA. Παρατηρήθηκε ότι το IEC δίνει περίπου 17% μεγαλύτερο ρεύμα για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά MT των Α/Γ, ως προς το ANSI, ενώ το CFA περίπου 6,5%. Επίσης, προσομοιώθηκε η απόκριση του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου σε κατάσταση λειτουργίας σφάλματος, με χρήση του λογισμικού πακέτου CYMGrd, παρατηρώντας ότι οι % αποκλίσεις υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος μεταφέρονται κατά τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) σε κάθε σύστημα γείωσης, λόγω της γραμμικότητας που παρουσιάζει το μοντέλο ανάλυσης του φαινομένου διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στην γη, μέσω ενός πλέγματος γείωσης. Στο σημείο αυτό θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στην παρεχόμενη ασφάλεια, από το διασυνδεδεμένο σύστημα γείωσης του εν λόγω αιολικού πάρκου. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη ασφάλειας για το αιολικό πάρκο, για την δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος, με τρεις μεθόδους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος (IEC/ ANSI/ CFA). Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι δύο (2) από τα δέκα (10) συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου (Α/Γ 3&7), παρά την μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, οδηγούνται σε αστοχία σύμφωνα με το Πρότυπο IEC δίνοντας επικίνδυνες τάσεις επαφής στα 2,5 m από τον πυλώνα, σε αντίθεση με το Πρότυπο ANSI και την μέθοδο CFA. Βέβαια, η επίδραση της προσθήκης υλικού επιφανείας είναι καταλυτική εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα γείωσης των Α/Γ 3 και 7 βρίσκεται στην ασφαλή πλευρά (safe side), δηλαδή ασφαλές ως προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις και με τις τρεις μεθόδους. Ολοκληρώνοντας, η υπολογιστική αβεβαιότητα που σχετίζεται με την παρεχόμενη ασφάλεια του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου αναδεικνύει την αναγκαιότητα μιας ακριβούς μεθόδου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος προκειμένου να εξασφαλίζεται μέγιστη δυνατή ασφάλεια έναντι των αναπτυσσόμενων τάσεων (βηματικών και επαφής) και παράλληλα αποφυγή υπερδιαστασιολόγησης του συστήματος γείωσης (μείωση της αντίστασης γείωσης, προσθήκη υλικού επιφανείας), που συνεπάγεται περιττή αύξηση κόστους.

Βιβλιογραφία

- [1] B. De Metz-Noblat, F. Dumas, G. Thomasset “Calculation of short-circuit currents”, Schneider Electric, Cahier Technique no. 158, 2002.
- [2] Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, “Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις”, Β. Κ. Παπαδιά, Αθήνα 1993.
- [3] Ismail Kasikci, “ Short Circuit in Power Systems – A practical Guide to IEC 60909”, Εκδόσεις Wiley-VCH, 2002.
- [4] D. Nedic, G. Bathurst, J. Heath, ‘A Comparison of Short Circuit Calculation Methods and Guidelines for Distribution Networks’, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, May 2007.
- [5] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of short-circuit currents, 2001.
- [6] Th. Boutsika, S. Papathanassiou, N. Drossos, ‘Calculation of the Fault Level contribution of Distributed Generation according to IEC Standard 60909’, Proc.CIGRE DG Symposium, Athens, Greece, April 2005.
- [7] IEC 60909-1, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, 2002.
- [8] IEC 60909-2, Electrical equipment - Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 909 (1988), 1992.
- [9] IEC 60909-4, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4 : Examples for the calculation of short-circuit currents, 2000.
- [10] The Electrical Transmission and Distribution Reference Book (ABB), Chapter 4, Electrical characteristics of cables, 1964.
- [11] VDE 0102, “The Calculation of Short Circuit Current in Three Phase Systems”, Frankfurt : Deutche Elektrotechnische Kommission D-6000, 1972.
- [12] ANSI/IEEE Std. C 37.010, IEEE Application Guide for AC High – Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1999.
- [13] ANSI/IEEE Std. C 37.13, IEEE Standard for Low–Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures, 1990.
- [14] ANSI/IEEE Std. 141, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book) , 1986.

- [15] ANSI/IEEE Std 80-2000, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2000.
- [16] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [17] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
- [18] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [19] IEEE Std 81.2-1991, “IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, June 1992.
- [20] I.F. Gonos, I. Stathopoulos, “Estimation of Multi -Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society – 2004 General Meeting, Denver, USA, June 6-10, 2004.
- [21] Φανή Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση κρίση, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [22] A.J. Rodolakis, A comparison of North American (ANSI) and European (IEC) fault calculation guidelines, IEEE Trans. Ind. Appl. 29, May/June (3) 1993, pp. 515–521.
- [23] Vestas V52-850kW/VMP Controller 5000.02-690V-50Hz, Electrical Data Description, 2009.
- [24] ΔΕΗ/ΔΜΚΜ, Προδιαγραφή SS-25/14: «Μετασχηματιστές ισχύος 150/21 kV, 40/50 MVA και 20/25 MVA, συνδεσμολογία Dyn1», Αθήνα Νοέμβριος 2000.
- [25] G. Knight, H. Sieling, “Comparison of ANSI and IEC 909 short-circuit current calculation procedures”, IEEE Trans. Ind. Appl. 29, May/June (3) 1993, pp. 625–630.
- [26] A. Berizzi, S. Massucco, A. Silvestri, D. Zaninelli, Short-circuit current calculation: a comparison between methods of IEC and ANSI standards using dynamic simulation as reference, IEEE Trans. Ind Appl. 30, July/August (43) 1994, pp.1099–1106.
- [27] Γκόνος Ι.Φ, Κονταργύρη Β.Θ., Φώτης Γ.Π., Σταθόπουλος Ι.Α, Μάνος Γ.Α., “Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση συστημάτων γείωσης σε αιολικά πάρκα”, Σύνοδος Ε.Ε CIGRE, Αθήνα 15-16 Δεκεμβρίου 2005, σελ. 201-208.
- [28] E.K. Saraoja, electromagnetic analysis of grounds “Lightning Grounds”, Chapter 18 of “Lightning – Volume 2” edited by R.H. Golde, Academic Press.

[29] IEC 61400 - 24 , Wind Turbine Generators Systems, Part 24 : Lightning Protection, 2002.

[30] BS 6651, “Lightning Protection of Structures”, 1992.

[31] Steven W. Saylor, Panel Session “Large Wind Plant Collector Design” Wind Farm Collector System Grounding, IEEE PES Transmission and Distribution Conference, 2008.

[32] M.I. Lorentzou, N.D. Hatziargyriou, G.A. Manos, T. Sietis, “Intergrated grounding system of wind-farms for lightning and fault protection”, MedPower 2004, Lemessos, Cyprus, 15-17 November 2004.

[33] Προδιαγραφή ΔΕΗ/ΔΝΕΜ-ΥΣ1, Τόμος 1, Αναθεώρηση 6Α (ΔΝΕΜ-ΥΣ1.Ι-6Α), “Τεχνική Περιγραφή Υπαίθριου Υ/Σ μεταφοράς 150kV/ΜΤ για Σύνδεση Ανεξάρτητου Παραγωγού με το Σύστημα”, Αύγουστος 2009.

[34] <http://www.cyme.com>