

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

Μ. Λορέντζου*

ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. / ΕΔΑΣΣ

Γ. Γεωργαντζής

ΔΕΗ Α.Ε. / ΔΚΣΔ

Ν. Χατζηαργυρίου

Ε.Μ.Π. / ΣΜΗ&ΜΥ

Στόχος του σχεδιασμού των συστημάτων γείωσης είναι η πρόληψη της ανάπτυξης υπερτάσεων στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και στην επιφάνεια του εδάφους, διαχέοντας αποτελεσματικά προς το έδαφος το ρεύμα σφάλματος. Στην εργασία αυτή γίνεται σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων μεθόδων σχεδιασμού συστημάτων γείωσης όπως αυτές παρουσιάζονται στα διεθνή πρότυπα. Αναφέρονται και σχολιάζονται τα κύρια σημεία καθώς και οι πιο σημαντικές διαφορές της έκδοσης 2000 του IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (Standard 80 – 2000) σε σχέση με την έκδοση 1986 (Standard 80 – 1986), όπως επίσης και με το CENELEC Harmonization Document 637 S1 “Power Installations exceeding 1kV A.C.” έκδοσης 1999, ως προς τις προτεινόμενες πρακτικές σχεδιασμού συστημάτων γείωσης. Αναφορικά με τα πρότυπα IEEE παρουσιάζονται παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών. Επίσης σχολιάζεται συγκριτικά το περιθώριο ασφαλείας που μπορεί να επιτευχθεί στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS INFLUENCING POWER SYSTEM GROUNDING

M. Lorentzou*

HTSO S.A.

G. Georgantzis

PPC S.A.

N. Hatziargyriou

N.T.U.A.

Objective of the design of grounding systems is the prevention of the development of overvoltages in the power transmission system as well as dangerous potentials in the surface of the earth, by effective dispersion into the ground of the fault current. In this paper a short description of the most important methods used for grounding systems design is done, as they are presented in the international standards. The most important differences between the standard 2000 IEEE "Guide for Safety in AC Substation Grounding" (Standard 80 - 2000) with respect to the version 1986 (Standard 80 - 1986) and also with the CENELEC Harmonization Document 637 S1 "Power Installations exceeding 1kV A.C." - 1999 considering the proposed practices for design of grounding systems are presented and commented. Referring to the IEEE standards, practical case studies, where the changes and modifications of calculations are obvious, are comparatively commented. Also the safety margin for existing installations that could be achieved is also taken into consideration.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα γείωσης σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποφεύγονται οι υπερτάσεις και οι άνω των επιτρεπομένων ορίων διαφορές δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ρεύματα σφάλματος πιθανόν να προκαλέσουν άμεση βλάβη στον εξοπλισμό ή έμμεση λόγω των μεταφερόμενων τάσεων οι οποίες πιθανόν να υπερβούν τις επιτρεπόμενες τιμές στην κοντινή περιοχή του σφάλματος. Για το σκοπό αυτό τα συστήματα γείωσης σχεδιάζονται στην πράξη έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ασφάλεια του προσωπικού που εργάζεται στον υποσταθμό, η προστασία του εξοπλισμού και η συνέχεια της παροχής ισχύος.

Η μεθοδολογία σχεδιασμού συστημάτων γείωσης με βάση τα υπάρχοντα πρότυπα είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Ξεκινώντας από ένα αρχικό σχεδιασμό γίνεται έλεγχος ικανοποίησης συγκεκριμένων κριτηρίων ασφαλείας τα οποία είναι διαφορετικά κατά την εφαρμογή του Ευρωπαϊκού προτύπου CENELEC HD 637 ή του προτύπου IEEE std.80. Εάν τα κριτήρια ασφαλείας δεν ικανοποιούνται, επαναλαμβάνεται ο σχεδιασμός και λαμβάνονται συγκεκριμένα μέτρα κυρίως ενίσχυσης του συστήματος γείωσης.

Στην εργασία αυτή γίνεται περιγραφή των κύριων σημείων της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο πρότυπο CENELEC HD 637, καθώς και εκείνης που χρησιμοποιείται στα πρότυπα IEEE std.80 έκδοσης 1986 και έκδοσης 2000. Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων [1],[2] και [3] αφορούν στις εξισώσεις υπολογισμού της αντίστασης γείωσης, τη μέθοδο υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος, του μέγιστου ανεκτού ρεύματος σφάλματος από το ανθρώπινο σώμα και των ανεκτών τάσεων επαφής. Αντίστοιχα οι κυριότερες διαφορές του νέου προτύπου IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding std 80/2000 σε σύγκριση με την έκδοση του 1986, std 80/1986, που επηρεάζουν την ανάλυση και το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης, είναι η διαφορά στις μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή απομείωσης χαλκίου C_s και η διαφορά στα αποτελέσματα υπολογισμού των αναπτυσσόμενων μέγιστων τάσεων επαφής βρόχου και βηματικών τάσεων, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην αναφορά [4]. Στα πλαίσια της εργασίας συγκρίνονται τα αποτελέσματα υπολογισμών από το παλαιό και το νέο πρότυπο IEEE για πρακτικές περιπτώσεις συστημάτων γείωσης. Επίσης συγκρίνονται οι ανεκτές τάσεις επαφής για διάφορα εδάφη και στρώματα χαλκίου κατά IEEE και CENELEC. Τέλος δίνονται παραδείγματα ώστε να δειχθεί η επίδραση των διαφορών στο περιθώριο ασφαλείας που επιτυγχάνεται σε συγκεκριμένα πλέγματα γείωσης.

☺

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

Ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης ανεξαρτήτως του προτύπου που χρησιμοποιείται, γίνεται σύμφωνα με συγκεκριμένα στάδια μεθοδολογίας η οποία έχει τη μορφή επαναληπτικού αλγορίθμου. Έτσι μετά από κάποιο αρχικό σχεδιασμό ελέγχεται στη συνέχεια το σύστημα ως προς την ασφάλεια που παρέχει, χρησιμοποιώντας κριτήρια τα οποία διαφέρουν ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο πρότυπο. Γενικότερα παρατηρούνται τα εξής:

- Η επιλογή του υλικού και της διατομής των αγωγών που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα γείωσης γίνεται καταρχήν με στόχο την αποφυγή της βλάβης από την θερμότητα και της μηχανικής φθοράς ή της διάβρωσης.
- Ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης του συστήματος ακολουθεί ένα αρχικό σχεδιασμό και γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που δίνονται στα πρότυπα IEEE ή στο πρότυπο CENELEC HD 637. Κατά τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης κατά IEEE τα αποτελέσματα είναι ακριβέστερα συγκριτικά με τα αποτελέσματα υπολογισμού κατά CENELEC, καθώς στο τελευταίο ο υπολογισμός γίνεται προσεγγιστικά.
- Τα κριτήρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιούνται κατά IEEE εξασφαλίζουν ότι οι υπολογισμένες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής βρόχου δε θα υπερβούν τις ανεκτές από τον ανθρώπινο οργανισμό τιμές όταν συμβεί βραχυκύκλωμα. Τα κριτήρια CENELEC διαφέρουν ως προς το ότι η βηματική τάση δεν λαμβάνεται υπόψη, επειδή γίνεται σαφές στο κείμενο του προτύπου ότι αυτή δεν υπερβαίνει τις ανεκτές για τον ανθρώπινο οργανισμό τιμές, όταν η τάση επαφής είναι εντός των ορίων που θέτει το πρότυπο.

3. ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE std 80/1986 ΚΑΙ std 80/2000

3.1. Γενικά

Γενικά τα δύο πρότυπα IEEE είναι όμοια ως προς τη δομή τους, αλλά διαφέρουν σε συγκεκριμένες μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ορισμένων μεγεθών. Πιο αναλυτικά, δεν υπάρχει διαφορά στον υπολογισμό της ελάχιστης διατομής αγωγού A_{min} , της αντίστασης γείωσης πλέγματος υποσταθμού R_g , του μέγιστου ρεύματος σφάλματος το οποίο διαρρέει προς γη μέσω του πλέγματος γείωσης I_G και του συντελεστή ανάκλασης εδάφους K . Αντίθετα διαφορές υπάρχουν στις μαθηματικές εξισώσεις για το συντελεστή απομείωσης της αντίστασης του εδάφους του επιφανειακού στρώματος του χαλκίου C_s , όπου οι δύο εξισώσεις αναλυτικού υπολογισμού όπως και οι δύο απλοποιημένες εξισώσεις διαφέρουν. Επίσης διαφορές υπάρχουν στα ενδιάμεσα στάδια υπολογισμού της υπολογισμένης τάσης επαφής βρόχου E_m και της υπολογισμένης βηματικής τάσης E_s .

Το ισοδύναμο μήκος αγωγών πλέγματος γείωσης για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής βρόχου όταν χρησιμοποιείται το IEEE std.80/1986 υπολογίζεται από τις εξισώσεις (1.α) και (1.β) για τις περιπτώσεις χωρίς κατακόρυφες ράβδους και με κατακόρυφες ράβδους αντίστοιχα.

$$\begin{aligned} L_m &= L_C + L_R & (1.α) & & L_m &= L_C + 1.15 \cdot L_R & (1.β) \\ L_s &= L_C + L_R & & & L_s &= L_C + 1.15 \cdot L_R & \end{aligned}$$

Στο IEEE std. 80/2000 για τα πιο πάνω μεγέθη δίνονται οι πιο κάτω εξισώσεις (2.α) και (2.β) αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} L_m &= L_C + L_R & (2.α) & & L_m &= L_C + \left(1.55 + 1.22 \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) L_R & (2.β) \\ L_s &= 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R & & & L_s &= 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R & \end{aligned}$$

Οι εξισώσεις (1.α) και (2.α) αναφέρονται σε πλέγματα χωρίς ράβδους γείωσης ή με λίγες μόνο διασπαρμένες στο πλέγμα, αλλά καμία στα άκρα του ή κατά μήκος της περιμέτρου του. Οι εξισώσεις (1.β) και (2.β) αναφέρονται στα πλέγματα με ράβδους στα άκρα και στην περίμετρο αλλά και στην έκταση του πλέγματος. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το L_m σε πλέγματα με ράβδους όπως προκύπτει από τον υπολογισμό με τη σχέση (2.β) είναι πάντα μεγαλύτερο από την τιμή που προκύπτει με χρήση της σχέσης (1.β) λόγω του συντελεστή 1.55, ο οποίος είναι μεγαλύτερος του 1.15. Οι γενικές εξισώσεις υπολογισμού των E_m , E_s , $E_{touch,70}$ και $E_{step,70}$ είναι ίδιες, αλλά οι τιμές των παραμέτρων n , K_i , L_m , L_s στις εξισώσεις αυτές αλλάζουν

3.2. Εξισώσεις υπολογισμού του συντελεστή απομείωσης C_s και επίδραση στις Ανεκτές Τάσεις

Στην επιφάνεια του εδάφους άνω του πλέγματος γείωσης συνήθως τοποθετείται επιφανειακό στρώμα από υλικό υψηλής ειδικής αντίστασης, όπως το χαλίκι, με στόχο την αύξηση της αντίστασης κατά την επαφή του ανθρώπου με το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό αυξάνονται οι ανεκτές βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Για τον συνυπολογισμό της συνεισφοράς του χαλικιού προτείνονται αντίστοιχα στο παλαιό και το νέο πρότυπο IEEE οι απλοποιημένες εμπειρικές εξισώσεις (3.α) και (3.β):

$$\begin{aligned} C_s(\rho)_{80/2000} &= 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 \cdot h_s + 0.09} & (3.α) & & C_s(\rho)_{80/2000} &= 1 - \frac{0.106 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 \cdot h_s + 0.106} & (3.β) \end{aligned}$$

όπου ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm
 ρ_s : η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του χαλικιού σε Ωm

Στο σχήμα 1, συγκρίνονται οι τιμές του συντελεστή C_s όπως προκύπτουν από εφαρμογή των εξισώσεων (3.α) και (3.β), ενώ στο σχήμα 2 συγκρίνονται οι τιμές του συντελεστή C_s που προκύπτουν από υπολογισμούς με πιο ακριβείς σχέσεις [1,2,4]. Το πάχος του χαλικιού h_s λαμβάνεται ίσο με 0.05m, 0.10m, 0.15m, 0.20m, 0.25m, 0.30m και η ειδική αντίσταση του ρ_s ίση με 2500 Ωm . Για την εκτίμηση του ποσοστού της διαφοράς μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται από το std 80/1986 και των τιμών από το std 80/2000, υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης (4), η οποία παριστάνεται γραφικά στα σχήματα 1 και 2.

$$F_{C_s}(\rho) = \frac{C_s(\rho)_{80/2000} - C_s(\rho)_{80/1986}}{C_s(\rho)_{80/1986}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Η μέγιστη ανεκτή τάση επαφής και η μέγιστη ανεκτή βηματική τάση για ανθρώπινο σώμα βάρους 70kg υπολογίζονται και στα δύο IEEE standards από τις εξισώσεις (5.α) και (5.β). Αν θεωρηθεί ότι το ανθρώπινο σώμα έχει βάρος 50kg, οι υπολογισμοί στις εξισώσεις θα πρέπει να γίνουν αντικαθιστώντας το συντελεστή 0.157 με 0.116.

$$\begin{aligned} E_{touch,70} &= (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} & (5.α) & & E_{step,70} &= (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} & (5.β) \end{aligned}$$

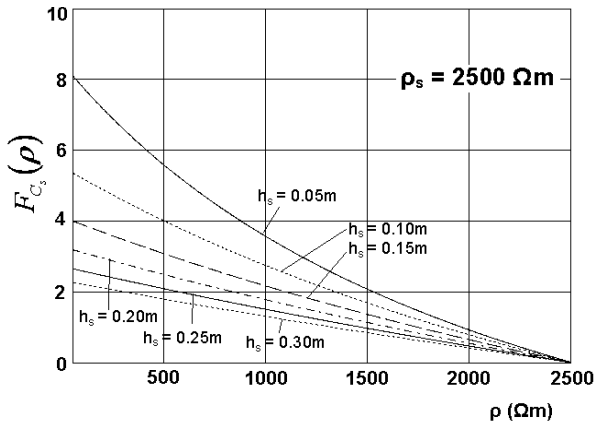
Στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές των $E_{touch,70}$ και $E_{step,70}$ οι οποίες έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με τα [1] και [2]. Οι εκτιμήσεις του ποσοστού της διαφοράς μεταξύ των τιμών, δηλαδή οι συναρτήσεις (6.α) και (6.β) υπολογίζονται και παριστάνονται γραφικά στα σχήματα 3 και 4 αντίστοιχα.

$$F_{E_{touch,50}}(\rho) = F_{E_{touch,70}}(\rho) = \frac{E_{touch,70}(\rho)_{80/2000} - E_{touch,70}(\rho)_{80/1986}}{E_{touch,70}(\rho)_{80/1986}} \cdot 100\% = \frac{1.5 \cdot \rho_s \cdot (C_s(\rho)_{80/2000} - C_s(\rho)_{80/1986})}{1000 + 1.5 \cdot \rho_s \cdot C_s(\rho)_{80/1986}} \cdot 100\% \quad (6.α)$$

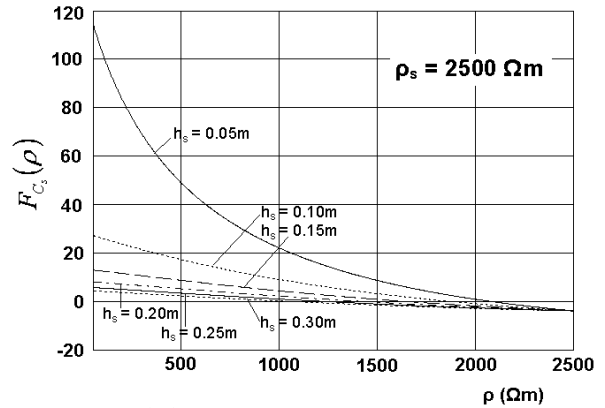
$$F_{E_{step,50}}(\rho) = F_{E_{step,70}}(\rho) = \frac{E_{step,70}(\rho)_{80/2000} - E_{step,70}(\rho)_{80/1986}}{E_{step,70}(\rho)_{80/1986}} \cdot 100\% = \frac{6 \cdot \rho_s \cdot (C_s(\rho)_{80/2000} - C_s(\rho)_{80/1986})}{1000 + 6 \cdot \rho_s \cdot C_s(\rho)_{80/1986}} \cdot 100\% \quad (6.β)$$

Στο σχήμα 1 όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα υπολογισμών έχοντας χρησιμοποιήσει τους εμπειρικούς τύπους υπολογισμού του C_s παρατηρείται ότι η εφαρμογή της εμπειρικής εξίσωσης που προτείνεται στο παλαιό πρότυπο οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές του C_s συγκριτικά με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της αντίστοιχης εξίσωσης του νέου προτύπου. Στο σχήμα 2 του οποίου οι καμπύλες χαράσσονται βάσει των αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού του

C_s παρατηρούμε ότι οι τιμές του C_s όπως υπολογίζονται από το πρότυπο 80/1986 και το πρότυπο 80/2000 είναι ίσες για κάποια συγκεκριμένη τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_o η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού στρώματος του χαλκιού h_s και ρ_s . Όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι υψηλότερη του ρ_o η τιμή από το πρότυπο 80/2000 γίνεται μικρότερη από εκείνη που υπολογίζεται σύμφωνα με το παλιό πρότυπο. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι σε όλες τις περιπτώσεις η εγκατάσταση πλέγματος γείωσης είναι πρακτικά εφικτή όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν υπερβαίνει περίπου τα 500Ωm, οπότε η τιμή του C_s υπολογισμένη από το νέο πρότυπο θα είναι πάντα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του παλαιού προτύπου.



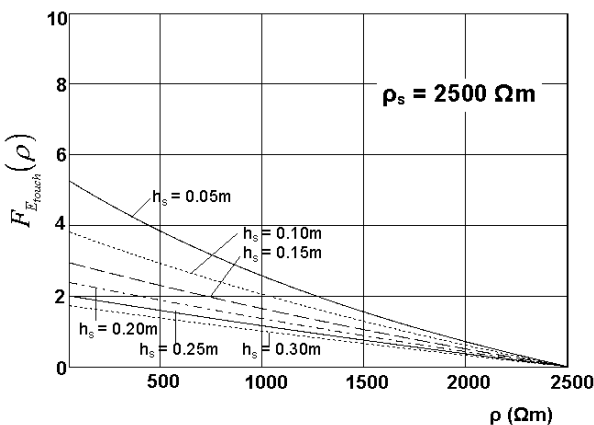
Σχήμα 1: $F_{C_s}(\rho)$ ως προς ρ , με $\rho_s = 2500 \Omega m$ και με βάση τους εμπειρικούς τύπους υπολογισμούς του C_s



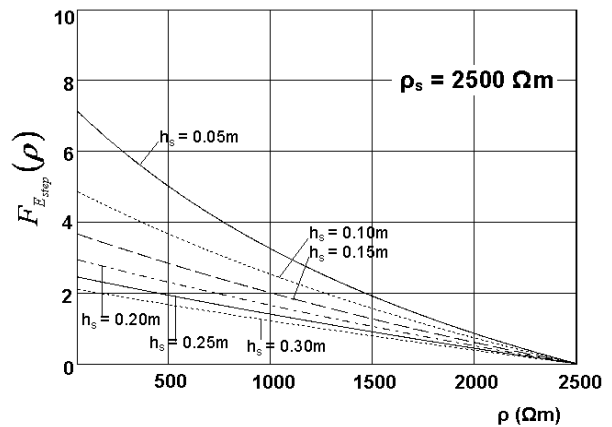
Σχήμα 2: $F_{C_s}(\rho)$ ως προς ρ , με $\rho_s = 2500 \Omega m$ και με βάση τους αναλυτικούς τύπους υπολογισμούς του C_s

Στα σχήματα 3 και 4, παρατηρούνται τα εξής :

- Εφαρμογή του νέου προτύπου [2] οδηγεί πάντα σε υψηλότερες τιμές της ανεκτής τάσης επαφής και της ανεκτής βηματικής τάσης από εκείνες που λαμβάνονται με τη χρήση του παλαιού προτύπου [1].
- Οι συναρτήσεις $F_{E_{touch}}$ και $F_{E_{step}}$ μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους.
- Μεγαλύτερες διαφορές τιμών E_{touch} και E_{step} από τα δύο πρότυπα παρατηρούνται για μικρότερο πάχος χαλκιού.
- Τα ποσοστά της διαφοράς μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται από τα δύο πρότυπα δεν εξαρτώνται από τη χρονική διάρκεια του σφάλματος ή το βάρος του ανθρώπινου σώματος.
- Από σχετική διερεύνηση [4] προκύπτει ότι μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές των E_{touch} και E_{step} υπολογισμένες από τα δύο πρότυπα, εμφανίζονται όταν η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του χαλκιού είναι υψηλότερη.



Σχήμα 3: $F_{E_{touch}}(\rho)$ ως προς ρ , με $\rho_s = 2500 \Omega m$ και με βάση τους εμπειρικούς τύπους υπολογισμού του C_s



Σχήμα 4: $F_{E_{step}}(\rho)$ ως προς ρ , με $\rho_s = 2500 \Omega m$ και με βάση τους εμπειρικούς τύπους υπολογισμού του C_s

3.3. Διαφορές στις υπολογισμένες Τάσεις Επαφής Βρόχου και Βηματικές Τάσεις

Ακολουθώς συγκρίνονται οι τιμές των υπολογισμένων τάσεων επαφής βρόχου και βηματικών τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους άνω του πλέγματος του υποσταθμού, όπως υπολογίζονται από τα δύο IEEE standards [1] and [2]. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς του τάσεων επαφής βρόχου και βηματικών τάσεων είναι οι (7.α) και (7.β). Στις εξισώσεις αυτές οι τιμές του L_m από τα δύο πρότυπα διαφέρουν μόνο όταν υπάρχουν εγκατεστημένες κατακόρυφες ράβδοι, ενώ οι τιμές του L_s και του K_i διαφέρουν σε κάθε περίπτωση.

$$E_m = \rho \cdot K_i \cdot K_m \cdot I_G / L_M \quad (7.a)$$

$$E_s = \rho \cdot K_i \cdot K_s \cdot I_G / L_s \quad (7.β)$$

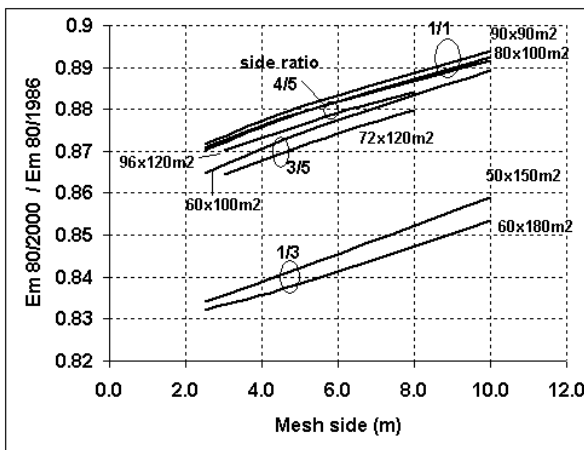
Οι μέγιστες υπολογισμένες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής μεταβάλλονται γραμμικά συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους και υπολογίζονται από τις ίδιες μαθηματικές εξισώσεις και στα δύο πρότυπα, οπότε τα συμπεράσματα τα οποία ισχύουν για μία συγκεκριμένη τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ισχύουν για κάθε τιμή της ειδικής αντίστασης. Στις εφαρμογές στα πλαίσια της εργασίας αυτής έχουν εξεταστεί μόνο τετράγωνα και ορθογώνιου σχήματος πλέγματα. Για τις παραμέτρους του πλέγματος οι οποίες δεν μεταβάλλονται κατά τους υπολογισμούς, επιλέχθηκαν τιμές οι οποίες συναντώνται συχνά στην πράξη, δηλαδή διάμετρος αγωγών 0.01m, βάθος πλέγματος 0.60m, ρεύμα σφάλματος προς γη 15kA, ειδική αντίσταση του εδάφους 100 Ωm, διάρκεια σφάλματος 0.5s, και επιφανειακό στρώμα χαλκιού πάχους 0.10m και ειδικής αντίστασης 2500Ωm. Τα αποτελέσματα, αλλά και τα ενδιάμεσα στάδια των υπολογισμών, παρουσιάζονται αναλυτικά στην αναφορά [4].

3.3.1. Υπολογισμένη Τάση Επαφής Βρόχου

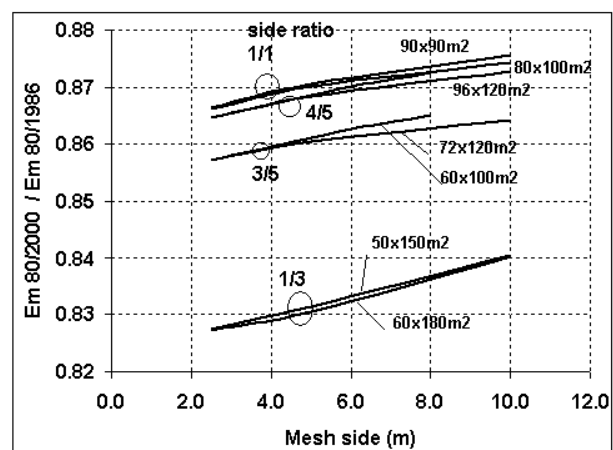
A. Πλέγματα χωρίς ράβδους γείωσης ή με λίγες ράβδους διασκορπισμένες στην περιοχή του πλέγματος

Οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται βάσει του std 80/1986 και του std 80/2000 οφείλονται σε διαφορές στα εξής:

- Στον ισοδύναμο αριθμό παράλληλων αγωγών n που υπολογίζεται από διαφορετική μαθηματική εξίσωση.
- Στο συντελεστή ανομοιομορφίας K_i ο οποίος υπολογίζεται από διαφορετική μαθηματική εξίσωση, εισάγοντας έτσι διαφορά στα αποτελέσματα ακόμη και όταν το n είναι ίδιο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση τετράγωνων πλεγμάτων. Στο σχήμα 5 φαίνεται ο λόγος του E_m όπως αυτό υπολογίστηκε με το std 80/2000 προς την τιμή που υπολογίζεται από το std 80/1986 θεωρώντας ότι οι διαστάσεις βρόχου είναι 2.5m ως 10m. Παρατηρείται ότι:
- Ο λόγος του E_m υπολογισμένου σύμφωνα με std 80/2000 προς την τιμή του υπολογισμένη με το std 80/1986 αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και περίπου με την ίδια κλίση αυξανόμενων των διαστάσεων του βρόχου του πλέγματος σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.
- Ο λόγος $E_{m80/2000} / E_{m80/1986}$, όταν το πλέγμα έχει λίγες ράβδους μόνο στο κέντρο του, με ακριβώς την ίδια τοποθέτηση στις δύο περιπτώσεις, είναι ίσος με το λόγο των $E_{m80/2000} / E_{m80/1986}$ υπολογισμένο για την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν ράβδοι.
- Για τον ίδιο λόγο πλευρών, η τιμή του E_m υπολογισμένη με το std 80/2000 είναι χαμηλότερο ποσοστό του E_m υπολογισμένου με το std 80/1986 αυξανόμενης της επιφάνειας του πλέγματος
- Διατηρώντας σταθερή την επιφάνεια του πλέγματος και επανασχεδιάζοντας με μεγαλύτερο λόγο πλευρών, οι τιμές του E_m από το νέο πρότυπο πλησιάζουν περισσότερο τις τιμές από το παλαιό πρότυπο και οπότε ο λόγος $E_{m80/2000} / E_{m80/1986}$ είναι μεγαλύτερος



Σχήμα 5: $E_{m80/2000} / E_{m80/1986}$ συναρτήσει των διαστάσεων βρόχου για πλέγματα χωρίς ράβδους



Σχήμα 6: $E_{m80/2000} / E_{m80/1986}$ συναρτήσει των διαστάσεων βρόχου για πλέγματα με κατακόρυφες ράβδους

B. Πλέγματα με κατακόρυφες ράβδους γείωσης στις γωνίες, στην περίμετρο και σε όλη την επιφάνεια

Οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του παλαιού και του νέου πρότυπο οφείλονται σε διαφορές στα εξής :

- Στον ισοδύναμο αριθμό παράλληλων αγωγών n που υπολογίζεται από διαφορετική μαθηματική εξίσωση.
- Στο συντελεστή διόρθωσης K_i ο οποίος υπολογίζεται με χρήση διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων, εισάγοντας μία διαφορά στα αποτελέσματα, ακόμη κι όταν το n είναι ίδιο όπως αυτό συμβαίνει για τετράγωνα πλέγματα. Στο σχήμα 6 φαίνεται ο λόγος της ανεκτής τάσης επαφής E_m υπολογισμένης κατά το 80/2000 προς την τιμή κατά το 80/1986 με

διαστάσεις βρόχου 2.5m ως 10m. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι τοποθετούνται ράβδοι συνολικού μήκους 100m κατά μήκος της περιμέτρου και στην επιφάνεια του πλέγματος.

- Σε πλέγματα χωρίς ράβδους, ο λόγος του E_m υπολογισμένου σύμφωνα με το πρότυπο 80/2000 προς την τιμή που υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο 80/1986 αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και περίπου με την ίδια κλίση αυξανόμενων των διαστάσεων του βρόχου, σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.
- Ο λόγος $E_{m_{80/2000}} / E_{m_{80/1986}}$ συγκρινόμενος με τις τιμές του ίδιου λόγου στο σχήμα 5, λαμβάνει χαμηλότερες τιμές όταν όλες οι άλλες παράμετροι σχεδιασμού παραμένουν οι ίδιες.
- Προσθέτοντας στο πλέγμα περισσότερες κατακόρυφες ράβδους, ο λόγος $E_{m_{80/2000}} / E_{m_{80/1986}}$ παραμένει σχεδόν σταθερός συναρτήσει των διαστάσεων του πλέγματος. Συνεπώς, είναι μικρότερος από το λόγο που φαίνεται στο σχήμα 6. Επίσης ισχύουν τα συμπεράσματα που εξάγονται με βάση το σχήμα 5.

3.3.2. Υπολογισμένη Βηματική Τάση

Οι διαφορές μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από εφαρμογή του std 80/1986 και του std 80/2000, τόσο για τα πλέγματα χωρίς κατακόρυφες ράβδους γείωσης ή με λίγες ράβδους διασκορπισμένες σε όλο το πλέγμα αλλά καμία στις γωνίες του ή κατά μήκος της περιμέτρου όσο και για τα πλέγματα με ράβδους, οφείλονται κυρίως στις διαφορές στο ισοδύναμο πλήθος των παράλληλων αγωγών n , στο συνολικό μήκος αγωγών L_s και στον συντελεστή K_i . Στα αποτελέσματα υπολογισμών για διάφορες περιπτώσεις ορθογώνιων πλεγμάτων, όπως παρουσιάζονται στην αναφορά [4], παρατηρείται ότι η υπολογισμένη βηματική τάση σύμφωνα με το std 80/2000 λαμβάνει υψηλότερες τιμές από εκείνες που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το std 80/1986 όταν ο λόγος των πλευρών είναι μεγαλύτερος από 0.8 ενώ τα κριτήρια ασφαλείας ικανοποιούνται σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

4. ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE 80/2000 ΚΑΙ CENELEC HD 637

4.1. Γενικά

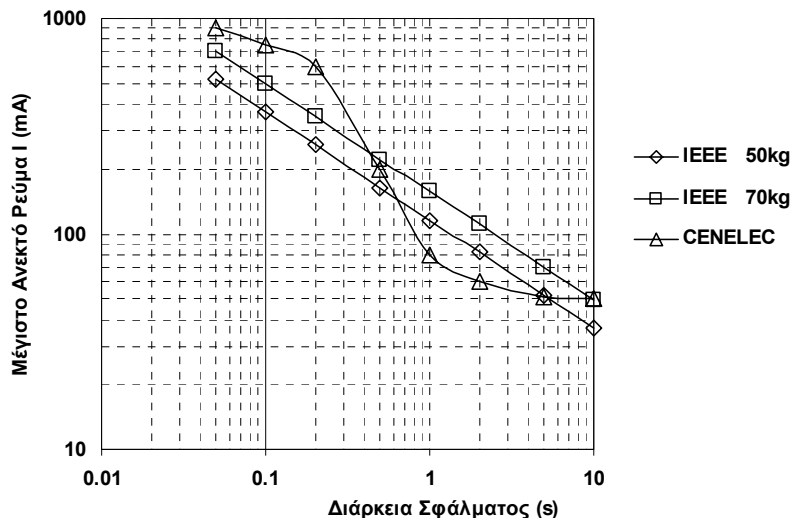
Τα πρότυπα IEEE αφορούν αποκλειστικά και μόνο στον ασφαλή σχεδιασμό συστημάτων γείωσης υποσταθμών, ενώ στο πρότυπο της CENELEC, εκτός από τα συστήματα γείωσης, περιλαμβάνονται γενικές οδηγίες για το συνολικό ηλεκτρολογικό σχεδιασμό των εγκαταστάσεων όπου η τάση λειτουργίας υπερβαίνει το 1kV. Παρατηρείται ότι σε όλα τα πρότυπα χρησιμοποιούνται οι ίδιες μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της ελάχιστης διατομής των αγωγών γείωσης. Οι πιο σημαντικές όμως διαφορές μεταξύ των προτύπων IEEE και CENELEC είναι:

- Στο πρότυπο CENELEC δεν χρησιμοποιείται η βηματική τάση, ενώ στα πρότυπα IEEE η ικανοποίηση του κριτηρίου της βηματικής τάσης αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο για τον ασφαλή σχεδιασμό της γείωσης.
- Η αντίσταση γείωσης στο πρότυπο CENELEC υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες διαφέρουν από εκείνες που χρησιμοποιούνται στα πρότυπα της IEEE και οδηγούν σε λιγότερο ακριβή υπολογισμό.
- Το μέγιστο ανεκτό ρεύμα είναι δυνατόν να υπολογισθεί με τις μαθηματικές εξισώσεις που δίνονται στα πρότυπα IEEE ή να προσδιορισθεί από πίνακα ο οποίος δίνεται στο πρότυπο της CENELEC. Οι τιμές που προκύπτουν με τους δύο αυτούς τρόπους φαίνονται στο σχήμα 7, όπου μπορεί να παρατηρηθεί ότι για χρόνους διάρκειας σφάλματος μικρότερους από 0.5s το πρότυπο CENELEC δίνει ανεκτή τιμή ρεύματος σφάλματος διερχόμενου από το ανθρώπινο σώμα σαφώς υψηλότερη από τις τιμές που υπολογίζονται κατά IEEE. Για χρόνους σφάλματος περίπου από 0.5s έως ολίγων δευτερολέπτων το ευρωπαϊκό πρότυπο δίνει μικρότερο ανεκτό ρεύμα σφάλματος, ενώ για μεγαλύτερες διάρκειες σφάλματος οι τιμές από τα δύο πρότυπα προσεγγίζουν.
- Κατά το σχεδιασμό σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο CENELEC θα πρέπει είτε η ανύψωση δυναμικού του εδάφους (Ground Potential Rise – GPR) να είναι μικρότερη από την ανεκτή τάση U_{Tp} , είτε το ρεύμα που θα διέλθει δια μέσου του ανθρώπινου σώματος να είναι μικρότερο ή ίσο του ανεκτού I_B . Η πρώτη συνθήκη είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, οπότε κατά κανόνα ικανοποιείται η δεύτερη συνθήκη, η οποία ισοδυναμεί με τη σχέση ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής παντού στο πλέγμα να είναι μικρότερες ή ίσες του ορίου U_{STp} . Έτσι είναι δυνατόν να συγκριθούν τα πρότυπα IEEE με τα πρότυπα CENELEC μόνο ως προς την ανεκτή τάση επαφής, η οποία υπολογίζεται αντίστοιχα από τις εξισώσεις (8.α) και (8.β), όπου R_B είναι η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος ίση με 1000Ω, Z_B η συνθετη αντίσταση του ανθρώπινου σώματος που σχετίζεται με την τάση επαφής U_T σύμφωνα με τον πίνακα C.2 [3] και R_{a1} η αντίσταση των υποδημάτων.

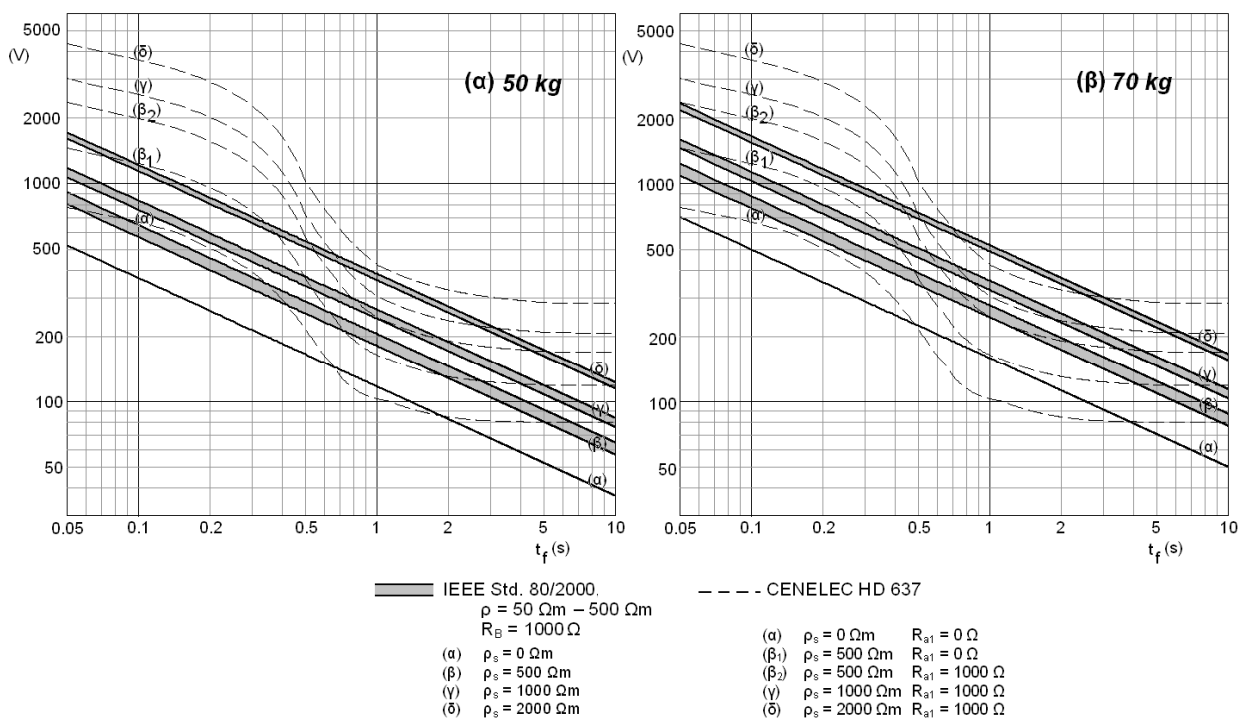
$$E_{Touch} = (R_B + 1.5 \cdot \rho_s \cdot C_s) \cdot I_B \quad (8.α) \quad U_{STp} = (Z_B + R_{a1} + 1.5 \cdot \rho_s) \cdot I_B \quad (8.β)$$

Στο σχήμα 8 φαίνονται οι τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης επαφής συναρτήσει της διάρκειας σφάλματος, κατά IEEE, όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται από 50Ωm έως 500Ωm, για ανθρώπινο σώμα 50kg ή 70kg. Επίσης έχουν αναπαραχθεί και φαίνονται τα όρια U_{STp} όπως αυτά δίνονται στο πρότυπο CENELEC [3]. Στον υπολογισμό κατά CENELEC δεν λαμβάνεται υπόψη η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ , ενώ στον υπολογισμό κατά IEEE δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση υποδημάτων R_{a1} . Συγκρίσιμες στο σχήμα 8 είναι η καμπύλη (α) από CENELEC με τις ευθείες (α) από IEEE, που υπολογίζονται θεωρώντας μη τοποθέτηση χαλκιού, οι καμπύλες (β1)

και (β_2) από CENELEC με τα εύρη τιμών (β) από IEEE και αντίστοιχα οι καμπύλες (γ) και (δ) από CENELEC με τα εύρη τιμών (γ) και (δ) από IEEE. Γενικά παρατηρείται πως όταν η διάρκεια του σφάλματος είναι μικρή το όριο της Τάσης Επαφής κατά CENELEC είναι ελαστικότερο από εκείνο που υπολογίζεται κατά IEEE, για μεσαία διάρκεια σφάλματος το όριο CENELEC είναι αυστηρότερο και είναι πάλι ελαστικότερο όταν το σφάλμα διαρκεί άνω των ολίγων δευτερολέπτων.



Σχήμα 7: Μέγιστο ρεύμα διερχόμενο από ανθρώπινο σώμα συναρτήσει της διάρκειας σφάλματος



Σχήμα 8: Μέγιστη επιτρεπόμενη Τάση Επαφής κατά CENELEC και IEEE για ανθρώπινο βάρος α) 50kg και β) 70kg

4.2. Εφαρμογές - Διερεύνηση

Στην παράγραφο αυτή γίνεται διερεύνηση των περιθωρίων ασφαλείας τα οποία δίνονται από υπολογισμούς με βάση το πρότυπο CENELEC και το πρότυπο IEEE και συγκρίνονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις με τα όρια των ανεκτών τάσεων επαφής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο στα πρότυπα IEEE δίνονται εξισώσεις υπολογισμού των Τάσεων Επαφής Βρόχου, οπότε η εφαρμογή του προτύπου CENELEC γίνεται είτε υπολογίζοντας τις τάσεις επαφής βρόχου σύμφωνα με το πρότυπο IEEE είτε μετρώντας τις.

Για τις παραμέτρους του πλέγματος οι οποίες δεν μεταβάλλονται κατά τους υπολογισμούς, επιλέχθηκαν τιμές οι οποίες συναντώνται συχνά στην πράξη, δηλαδή διάμετρος αγωγών 0.01m, βάθος πλέγματος 0.60m και ρεύμα σφάλματος προς γη 15kA. Η ειδική αντίσταση του εδάφους θεωρήθηκε 100 Ωm , η διάρκεια σφάλματος 0.3s, 0.5s, 0.7s και 1s και τέλος θεωρείται επιφανειακό στρώμα χαλκιού πάχους 0.10m και ειδικής αντίστασης 2000 Ωm . Αναλυτικά

αποτελέσματα αλλά και αποτελέσματα των ενδιάμεσων σταδίων του υπολογισμού της τάσης επαφής βρόχου E_m παρουσιάζονται στην αναφορά [4].

Πίνακας 1: Υπολογισμένες και Ανεκτές Τάσεις Επαφής ορθογώνιων πλεγμάτων διαφόρων λόγων πλευρών

Διαστάσεις γηπέδου	Διαστάσεις βρόχου	Συνολικό Μήκος οριζοντίων αγωγών(m)	Συνολικό Μήκος κατακόρυφων ράβδων (m)	Τάση Επαφής Βρόχου E_m (V) IEEE std 80/2000	Ανεκτή Τάση Επαφής Βρόχου για $\rho_s = 2000 \Omega m$			
					$t_f = 0.3s$	$t_f = 0.5s$	$t_f = 0.7s$	$t_f = 1.0s$
50x150m ²	10x10m	1700	0	1719.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 893.0	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 691.7	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 584.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 489.2
	5x5m	3200	0	989.9				
	2.5x2.5m	6200	0	416.5				
	10x10m	1700	100	1624.1	CENELEC U_{STp} (δ) 2246.0	CENELEC U_{STp} (δ) 1013.0	CENELEC U_{STp} (δ) 614.4	CENELEC U_{STp} (δ) 422.0
	5x5m	3200	100	959.9				
	2.5x2.5m	6200	100	409.8				
72x120m ²	8x8m	2352	0	1369.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 893.0	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 691.7	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 584.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 489.2
	6x6m	3072	0	1089.3				
	3x3m	5952	0	519.7				
	8x8m	2352	100	1313.8	CENELEC U_{STp} (δ) 2246.0	CENELEC U_{STp} (δ) 1013.0	CENELEC U_{STp} (δ) 614.4	CENELEC U_{STp} (δ) 422.0
	6x6m	3072	100	1055.0				
	3x3m	5952	100	511.1				
80x100m ²	10x10m	1780	0	1719.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 893.0	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 691.7	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 584.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 489.2
	5x5m	3380	0	987.7				
	2.5x2.5m	6580	0	406.0				
	10x10m	1780	100	1628.1	CENELEC U_{STp} (δ) 2246.0	CENELEC U_{STp} (δ) 1013.0	CENELEC U_{STp} (δ) 614.4	CENELEC U_{STp} (δ) 422.0
	5x5m	3380	100	959.4				
	2.5x2.5m	6580	100	400.0				
90x90m ²	10x10m	1800	0	1708.2	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 893.0	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 691.7	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 584.6	IEEE (δ) $E_{Touch,70}$ 489.2
	5x5m	3420	0	981.1				
	2.5x2.5m	6660	0	402.4				
	10x10m	1800	100	1618.3	CENELEC U_{STp} (δ) 2246.0	CENELEC U_{STp} (δ) 1013.0	CENELEC U_{STp} (δ) 614.4	CENELEC U_{STp} (δ) 422.0
	5x5m	3420	100	953.2				
	2.5x2.5m	6660	100	396.5				

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή γίνεται σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων μεθόδων σχεδιασμού συστημάτων γείωσης όπως αυτές παρουσιάζονται στα διεθνή πρότυπα. Αναφέρονται και σχολιάζονται τα κύρια σημεία καθώς και οι πιο σημαντικές διαφορές των προτεινόμενων πρακτικών σχεδιασμού συστημάτων γείωσης. Στο πλαίσιο της σύγκρισης αυτής σημειώνεται ότι ο βασικός σχεδιασμός, καθώς και ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων, μπορεί να γίνει σύμφωνα με το πρότυπο IEEE. Παρατηρείται ότι σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC δεν χρειάζεται έλεγχος για την παραβίαση του ορίου της βηματικής τάσης, ενώ γίνεται σαφές στο κείμενο του προτύπου ότι εάν το σύστημα γείωσης είναι ασφαλές ως προς τις τάσεις επαφής τότε και οι βηματικές τάσεις θα βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Συγκρίνονται τα πρότυπα ως προς το υπολογισμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι επικίνδυνων τάσεων επαφής για πρακτικές περιπτώσεις συστημάτων γείωσης και παρατηρείται ότι το περιθώριο αυτό εξαρτάται κύρια από το χρόνο διάρκειας σφάλματος.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. "Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std.80-1986
2. "Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std.80-2000
3. CENELEC Harmonization Document 637 S1 "Power Installations exceeding 1kV a.c." -1999

4. M.Lorentzou, G.Georgantzis, N.Hatziargyriou: “Design and Analysis Factors influencing Power System Grounding”, Proceedings of IEE MedPower 2004 Conference Lemesos, Cyprus, 14.-17. November 2004.