



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**
ΣΟΛΩΜΟΥ 56, 10682 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ.: 0103803343, 0105192136 FAX: 0105192324

COMITE NATIONAL HELLENIQUE
56, RUE SOLOMOU, 10682 ATHENES, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

GREEK NATIONAL COMMITTEE
56, SOLOMOU STR., 10682 ATHENS, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

Δ5

ΣΧΕΔΙΑΣΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Ι.Φ. Γκόνοσ¹ Β.Θ. Κονταργύρη¹ Γ.Π. Φώτης¹ Ι.Α. Σταθόπουλος¹
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

Γ.Α. Μάνος²
Ελληνική Τεχνοδομική Ενεργειακή Α.Ε.

Η μέτρηση της συνολικής αντίστασης γείωσης ενός αιολικού πάρκου, που αποτελεί ένα εκτεταμένο σύστημα γείωσης, είναι μία χρονοβόρα διαδικασία, με αρκετά μεγάλο οικονομικό κόστος. Πολλές φορές, μάλιστα, είναι πάρα πολύ δύσκολη, ή ακόμα και αδύνατη, η πραγματοποίηση των μετρήσεων, λόγω τοπογραφικών και χωροταξικών περιορισμών που υφίστανται στην περιοχή του έργου. Η έλλειψη των κατάλληλων, σύμφωνα με το Πρότυπο, αποστάσεων για την πραγματοποίηση της μέτρησης της αντίστασης προσγείωσης σε ένα εκτεταμένο σύστημα γείωσης έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ακρίβεια της μέτρησης με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου σφάλματος μέτρησης. Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται η κατασκευή του συστήματος γείωσης με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της αντίστασης προσγείωσης του κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης (ανεμογεννήτριας, κέντρου ελέγχου, υποσταθμού, κ.λπ.) που υπάρχει στο αιολικό πάρκο. Συνδυασμός αυτών των ανεξάρτητων μετρήσεων δίνει τη συνολική αντίσταση γείωσης του αιολικού πάρκου. Η εμπειρία που έχει συσσωρευτεί από το σχεδιασμό και τη μέτρηση αντιπροσωπευτικών ελληνικών αιολικών πάρκων παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο.

DESIGN, ANALYSIS AND MEASUREMENT OF WINDFARMS' GROUNDING SYSTEMS

Ι.Φ. Gonos¹ V.T. Kontargyri¹ G.P. Fotis¹ I.A. Stathopoulos¹
High Voltage Laboratory NTUA

G.A. Manos²
ETAΕ

The measurement of the total grounding resistance of a windfarm, which consists an extended grounding system, is a time-consuming procedure with considerable economic cost. The measurements are often difficult or even impossible to be carried out due to topographical and land-planning limitations that there are at the worksite. The Standard defines that for the measurement of the grounding resistance in an extended grounding system there should be the appropriate distances. If this cannot be fulfilled, inaccuracies in the measurements may be expected. For these reasons the construction of the grounding system is proposed to be done in such a way in order the measurement of the grounding resistance of each independent grounding system (wind generator, control center, substation, etc) that there is in the windfarm to be possible. The combination of all these independent measurements gives the total grounding resistance of the windfarm. This paper presents the accumulated experience from the design and the measurement of representative Greek windfarms.

¹ Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Τηλ. 2107723582, Fax 2107723504, e-mail: igonos@ieee.org, vkont@power.ece.ntua.gr, gfortis@ieee.org, stathop@power.ece.ntua.gr

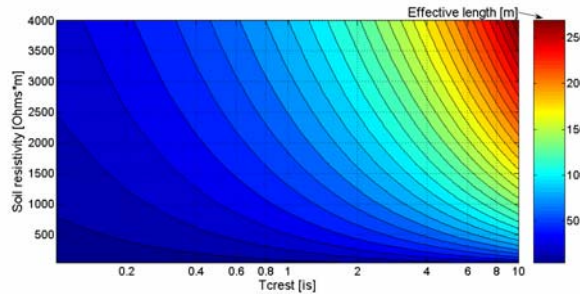
² Ελληνική Τεχνοδομική Ενεργειακή Α.Ε., Τηλ. 2108118409, Fax 2106800965, e-mail: gmanos@etae.com.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πλέγμα γείωσης ονομάζεται το σύστημα οριζόντιων ηλεκτροδίων γείωσης που αποτελείται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων, γυμνών αγωγών τοποθετημένων στη γη και παρέχει μια κοινή γείωση για ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές, συνήθως σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα πλέγματα που τοποθετούνται οριζόντια κοντά στην επιφάνεια της γης είναι επίσης αποτελεσματικά στον έλεγχο των επιφανειακών κλίσεων του δυναμικού. Ένα τυπικό πλέγμα συνήθως συμπληρώνεται από έναν αριθμό ράβδων, και μπορεί να συνδεθεί σε βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να ελαττωθεί η αντίσταση του πλέγματος [1].

Ενεργό μήκος ηλεκτροδίου γείωσης ℓ_e ονομάζεται το μήκος αυτού, πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασής του. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ (σε Ωm) και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού (T σε μs) και δίνεται από τη σχέση [2]:

$$\ell_e = 1.4 \cdot \sqrt{\rho \cdot T} \quad (1)$$



Σχήμα 1: Ενεργό μήκος συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του χρόνου μετώπου του κεραυνικού ρεύματος.

Το ενεργό μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης (Σχήμα 1) 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.

Βηματική τάση E_{step} ονομάζεται η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Εφόσον το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτονεύει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι η μέγιστη βηματική τάση υπό συνθήκες σφάλματος προς γη, προφανώς, προκύπτει στη θέση σφάλματος [1].

Τάση επαφής E_{touch} ονομάζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφάνειας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη δομή. Ο κίνδυνος από αυτό τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, γιατί η τάση εφαρμόζεται δια μέσου του σώματος και μπορεί να επηρεάσει τους μυς της καρδιάς [1].

Πολλές φορές 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, που θα διαρρέει το άτομο, 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 [1]:

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

όπου ρ_s και h_s η ειδική αντίσταση και το πάχος του υλικού επιφάνειας (σε $\Omega \cdot \text{m}$ και m , αντίστοιχα).

Τα επιτρεπτά όρια για τη βηματική και την τάση επαφής (σε V) δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [1]:

$$E_{step} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{C_w}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{touch} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{C_w}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

όπου t_s είναι η διάρκεια που διαρρέει το ρεύμα το ανθρώπινο σώμα (σε sec) και C_w σταθερά με τιμές 0.116 / 0.157 για σωματικό βάρος 50kg / 70kg αντίστοιχα. Όταν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφάνειας, τότε $C_s = 1$ και $\rho_s = \rho$.

Τα ελληνικά αιολικά πάρκα κατασκευάζονται συνήθως σε κορυφογραμμές με βραχώδες ή ημιβραχώδες έδαφος, με συνέπεια η ειδική αντίσταση του εδάφους να είναι πολύ μεγάλη, ενώ η διαθέσιμη περιοχή για το σύστημα γείωσης είναι συνήθως περιορισμένη. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι εφικτή η κατασκευή συστήματος γείωσης σε κάθε ανεμογεννήτρια, το οποίο να παρουσιάζει χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης. 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 [3, 4].

Εν ολίγοις, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης στοχεύει στην ασφαλή λειτουργία της, δηλαδή τον περιορισμό των κλίσεων δυναμικού γης σε τέτοια επίπεδα τάσης, ώστε, υπό συνθήκες σφάλματος, να μην κινδυνεύουν ούτε τα άτομα που βρίσκονται στην περιοχή, ούτε όμως και ο εξοπλισμός. Η μελέτη για το σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ασφαλή όρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής, ανάλογα με τη μέγιστη αναμενόμενη τιμή του ρεύματος σφάλματος και το συνολικό χρόνο εκκαθάρισής του [1]. Επιπλέον, οι τοπογραφικοί και χωροταξικοί περιορισμοί που υφίστανται στις περιοχές κατασκευής αιολικών πάρκων καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη μέτρηση της συνολικής αντίστασης γείωσης του αιολικού πάρκου, καθώς δεν υπάρχουν οι κατάλληλες αποστάσεις, σύμφωνα με το Πρότυπο [5] Για να είναι δυνατή η μέτρηση της αντίστασης γείωσης με ακρίβεια, προτείνεται η κατασκευή του συστήματος γείωσης με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της αντίστασης προσγείωσης του κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης (ανεμογεννήτριας, υποσταθμού, κέντρου ελέγχου, κλπ), που υπάρχει στο αιολικό πάρκο. Συνδυασμός αυτών των ανεξάρτητων μετρήσεων δίνει τη συνολική αντίσταση γείωσης του αιολικού πάρκου. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται τόσο η χρονική διάρκεια, όσο και το κόστος της μέτρησης.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

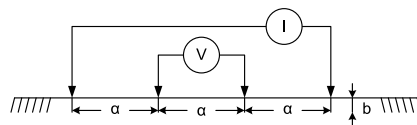
Κατόπιν εκτεταμένων μελετών [6-8] προέκυψε ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Για το σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και πάχος του κάθε στρώματος του εδάφους). Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται με βάση τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στη συνέχεια επιλέγεται η καταλληλότερη δομή (ως προς το πάχος των στρωμάτων) του εδάφους για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας και ξεκινάει η σχεδίαση του συστήματος γείωσης [3].

Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (Wenner) [6-8] θεωρείται η πλέον ακριβής για τη μέτρηση της μέσης ειδικής αντίστασης. Μικρά ηλεκτρόδια (ράβδοι) εμφυτεύονται σε βάθος b σε τέσσερα σημεία του εδάφους, τα οποία βρίσκονται στην ίδια ευθεία γραμμή και απέχουν μεταξύ τους απόσταση a (Σχήμα 2). Ρεύμα δοκιμής I επιβάλλεται στα δύο εξωτερικά (ακραία) ηλεκτρόδια και μετρείται το δυναμικό μεταξύ των δύο εσωτερικών (ενδιάμεσων) ηλεκτροδίων. Το πηλίκο V/I δίνει τη φαινόμενη αντίσταση R (σε Ω). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ δίνεται από τη σχέση [6-8]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + 2 \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (7)$$

Στην πράξη, τέσσερις ράβδοι τοποθετούνται επ' ευθείας γραμμής, σε απόσταση a απ' αλλήλων, και σε βάθος που να μην ξεπερνά το 0.1α. Τότε η σχέση (7) τροποποιείται ως εξής:

$$\rho \cong 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (8)$$



Σχήμα 2: Μέθοδος τεσσάρων σημείων (Wenner).

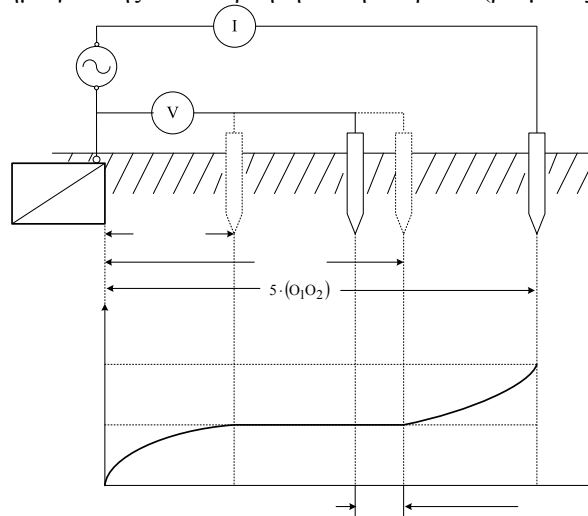
Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους (πλήθος / ειδική αντίσταση / πάχος στρωμάτων) είτε χρησιμοποιείται μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριό μας [8], η οποία με χρήση γενετικών αλγορίθμων υπολογίζει τη δομή του εδάφους, είτε οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους εισάγονται στον επιλύτη RESAP του προγράμματος CDEGS [3].

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η μέτρηση της αντίστασης γείωσης συνίσταται στη μέτρηση της αντίστασης του όγκου του εδάφους, που περιέχει το σύστημα γείωσης. Το ένα από τα δύο άκρα μεταξύ των οποίων μετρείται η αντίσταση γείωσης είναι γνωστό, καθώς αυτό είναι το ένα άκρο του συστήματος γείωσης. Το άλλο άκρο όμως, δεν είναι σαφώς καθορισμένο και χρειάζεται να διευκρινίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνουν, τα συστήματα γείωσης μπορούν να χωριστούν σε σημειακά (π.χ. κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ή τρίγωνο γείωσης) και σε εκτεταμένα (π.χ. πλέγμα). Συνήθως, αρκεί μια πεπερασμένη απόσταση πολλαπλάσια του μήκους του ηλεκτροδίου, έτσι ώστε το 98% της αντίστασης γείωσης να βρίσκεται εντός της καθορισμένης περιοχής [1, 5].

Μια πρακτική και αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης της αντίστασης γείωσης είναι αυτή της “πτώσης δυναμικού” [1, 2, 6], η οποία βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης δυναμικού κατά μήκος του εδάφους που προκαλείται από ένα ρεύμα που εγχύεται στο έδαφος σε κάποιο άλλο σημείο. Για τη μέτρηση των γειώσεων χρησιμοποιούνται δυο βοηθητικά

ηλεκτρόδια και πραγματοποιείται η συνδεσμολογία του σχήματος 3, όπου Α είναι το προς έλεγχο σύστημα γείωσης, Β και Γ τα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Ρεύμα I περνά από το έδαφος μέσω της γείωσης και επιστρέφει από το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, το τοποθετημένο στο σημείο Γ. Καθώς το ρεύμα περνά από τον όγκο του εδάφους, προκαλεί μια πτώση του δυναμικού. Η πτώση αυτή του δυναμικού μετρείται με το δεύτερο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (τάσεως) Β, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (ρεύματος) Γ.



Σχήμα 3: Μέτρηση αντίστασης γείωσης

Για τον έλεγχο (μέτρηση της αντίστασης γείωσης) των σημειακών γειώσεων, το ηλεκτρόδιο Γ τοποθετείται σε απόσταση 30 ως 50m από το σημείο Α, ενώ το Β σε απόσταση $AG/2$. Με αυτήν τη διάταξη λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση με τις συγκεκριμένες αποστάσεις και κατόπιν λαμβάνονται 2 έως 6 μετρήσεις μετακινώντας το Β πάνω στην ευθεία ΑΓ. Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι πολύ μικρή, γίνεται δεκτή σαν αντίσταση του γειωτή Α, ο μέσος όρος των πραγματοποιηθεισών μετρήσεων. Σε αντίθετη περίπτωση, μεγαλώνει η απόσταση ΑΓ και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις όπως πριν. Οι μετρήσεις θεωρούνται ικανοποιητικές όταν οι τιμές τους διαφέρουν μεταξύ τους μέσα σε αποδεκτά όρια. Στη γραφική παράσταση του σχήματος 2 απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού εντός του εδάφους μεταξύ του γειωτή Α και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ. Στην περιοχή όπου αυτό λαμβάνει μια σταθερή τιμή V_2 , τα ηλεκτρικά πεδία του γειωτή Α και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ δεν αλληλοεπηρεάζονται. Η μετρούμενη λοιπόν τιμή αντίστασης γείωσης στο τμήμα ΚΑ είναι και η πραγματική.

Οι γειώσεις των ανεμογεννητριών, όμως, ανήκουν στις εκτεταμένες γειώσεις και η αλληλεπίδραση των τμημάτων του γειωτή κάνει πιο δύσκολη την εύρεση της περιοχής ΚΑ [9]. Το πρότυπο IEEE 81.2 [5] προτείνει ως απόσταση ΑΓ το 6.5πλάσιο του μήκους της διαγωνίου του σχηματιζόμενου νοητού πολυγώνου, που δημιουργεί ο εκτεταμένος γειωτής O_1O_2 . Η απόσταση ΑΓ πρέπει να είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα και οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται από το 80% της ΑΓ προς το 20% της ΑΓ, με βήμα 4-10% της ΑΓ περίπου. Στην πράξη έχει εκτιμηθεί ότι, απόσταση ΑΓ 3πλάσια έως 5πλάσια του μήκους της διαγωνίου, που δημιουργεί ο εκτεταμένος γειωτής O_1O_2 , δίνει ικανοποιητική ακρίβεια στη μέτρηση [2]. Βέβαια, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ΑΓ, τόσο πιο εύκολα προσδιορίζεται η περιοχή ΚΑ, ενώ η απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης τιμής της αντίστασης του γειωτή και της πραγματικής μηδενίζεται.

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

Η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Γι' αυτό πρέπει να τονισθεί ότι είναι απαραίτητη η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που εμφανίζει την μέγιστη τιμή. 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.

Αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούμε για την κατασκευή του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου περιγράφονται παρακάτω:

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 ανεμογεννητριας ή κέντρου ελέγχου.

4. Εντοπισμός άλλων θέσεων στο αιολικό πάρκο που θα μπορούσαν να μειώσουν της 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 εγγυόμενου 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 [1].
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 χαλικιού, 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.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει εφαρμοσθεί στη σχεδίαση αρκετών αιολικών πάρκων της χώρας με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κάθε ανεμογεννήτρια και κέντρο ελέγχου θεωρήθηκε ως μεμονωμένο σύστημα λόγω της μεγάλης απόστασης από τα γειτονικά του: η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ανεμογεννητριών είναι περίπου 100m. Επομένως, η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι μεγαλύτερη από το ενεργό μήκος του συστήματος γείωσης για την πλειοψηφία των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Η διασύνδεσή τους προσομοιώθηκε θεωρώντας αγωγούς τοποθετημένους στο σημείο διασύνδεσης, μήκους ίσου με το ήμισυ της απόστασης μεταξύ του συγκεκριμένου συστήματος και του επομένου.

Τα πλέγματα γείωσης των ανεμογεννητριών (Σχήματα 4-6) και των κέντρων ελέγχου (Σχήμα 7) αποτελούνται από:

- ταινία γείωσης $40 \times 4 \text{ mm}^2$ (γαλβανισμένος χαλκός) μέσα στο σκυρόδεμα
- αγωγό γείωσης 150mm^2 (επικασσιτερωμένος χαλκός)
- κατακόρυφα ηλεκτρόδια $\Phi 19\text{mm}$ μήκους 3m

Το μήκος του τυπικού πλέγματος μιας ανεμογεννήτριας είναι 35m και το πλάτος του 25m, το δε βάθος τοποθέτησης 1m. Ο εξωτερικός δακτύλιος τοποθετημένος σε βάθος 2.5m, έχει διάμετρο 12m, ενώ ο εσωτερικός δακτύλιος, τοποθετημένος σε βάθος 1m, είναι διαμέτρου 3m. Το πλέγμα του κάθε κέντρου ελέγχου έχει διαστάσεις $10\text{m} \times 4\text{m}$, ενώ ο περιμετρικός αγωγός απέχει 2m από το υπόλοιπο πλέγμα. Το βάθος τοποθέτησης είναι 1m.

Στα συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατασκευής πλεγμάτων γείωσης για τις ανεμογεννήτριες και τα κέντρα ελέγχου αιολικού πάρκου.

1^η περίπτωση

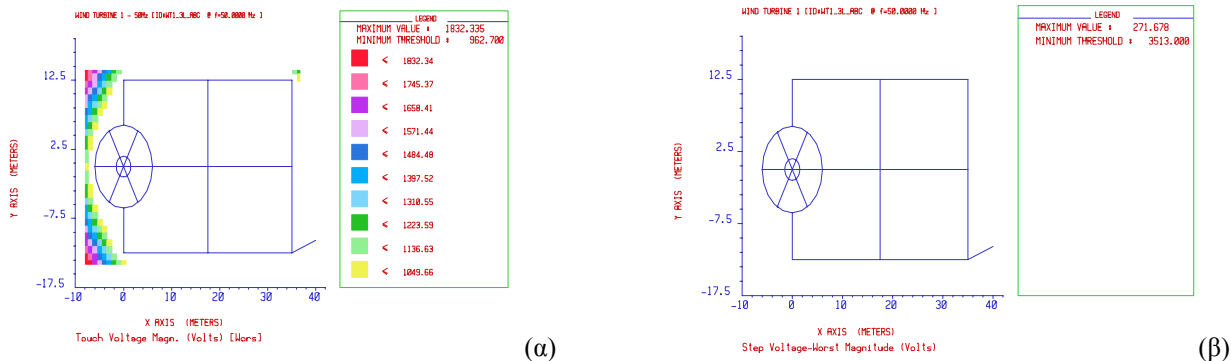
Για την ανεμογεννήτρια N^ο 1 (AG1), η οποία εντοπίζεται επί εδάφους με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 4838Ωm, δευτέρου στρώματος 2333Ωm, τρίτου στρώματος 13043Ωm, με πάχος πρώτου στρώματος 0,6m και δευτέρου 0,8m, επιλέχθηκε το πλέγμα γείωσης του Σχήματος 4. Η αντίσταση γείωσης της ανεμογεννήτριας υπολογίστηκε 127,5Ω, σύμφωνα με την αναπτυχθείσα μεθοδολογία. Αφού κατασκευάστηκε το σύστημα γείωσης, μετρήθηκε η τιμή της αντίστασης γείωσης και βρέθηκε $120 \pm 5\Omega$. Για τη μελέτη ασφάλειας του αιολικού πάρκου έχει θεωρηθεί ρεύμα βραχυκύκλωσης στην περιοχή ίσο με 800A, επιμεριζόμενο στα ανεξάρτητα συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου, ανάλογα με την αντίσταση ενός εκάστου εξ αυτών [4]. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής υπολογίστηκαν με βάση το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1] για άνθρωπο βάρους 50kg. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για τέσσερις διαφορετικούς χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος (0.1sec, 0.25sec, 0.5sec, 1sec) και τα

αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής ΑΓ1

	0.1 sec		0.25 sec		0.5 sec		1 sec	
	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]
Χωρίς υλικό επιφανείας	9033	2475	6470	1773	4826	1323	3513	963

Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα μέγιστα όρια για τις τάσεις επαφής, που αντιστοιχούν σε χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1sec, σχεδιάστηκαν τα γραφήματα της τάσης επαφής (Σχήμα 4α) και της βηματικής τάσης (Σχήμα 4β), τα οποία καταδεικνύουν το ασφαλές του συστήματος γείωσης. Επισημαίνεται ότι, η λευκή περιοχή στα γραφήματα σημαίνει ότι τα μεγέθη των ως άνω τάσεων είναι εντός ορίων.



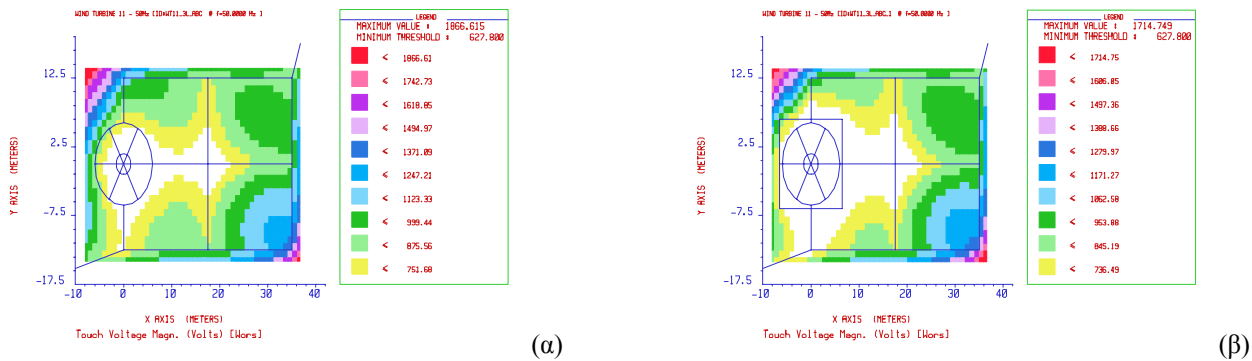
Σχήμα 4: ΑΓ1 α) Τάση επαφής, β) Βηματική τάση

2^η περίπτωση

Στο Σχήμα 5α παρουσιάζεται το πλέγμα γείωσης άλλης ανεμογεννήτριας (ΑΓ11), η οποία η οποία ευρίσκεται επί εδάφους με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 2932Ωm, δευτέρου στρώματος 1650Ωm, τρίτου στρώματος 15700Ωm, με πάχος πρώτου στρώματος 0,2m και δευτέρου 0,6m. Η αντίσταση γείωσης της ανεμογεννήτριας υπολογίστηκε 136,5Ω, ενώ μετρήθηκε 126±6Ω. Στην ΑΓ11 σε περίπτωση σφάλματος αναπτύσσεται τάση επαφής που είναι μεγαλύτερη από τα επιτρεπτά όρια (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής ΑΓ11

	0.1 sec		0.25 sec		0.5 sec		1 sec	
	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]
Χωρίς υλικό επιφανείας	5588	1614	4003	1156	2986	862	2174	628
Με προσθήκη υλικού	7181	2012	5144	1441	3837	1075	2793	783



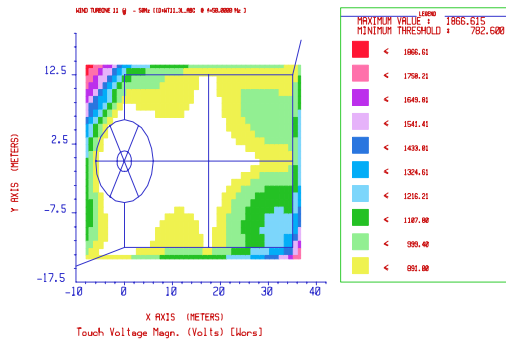
Σχήμα 5: α) Τάση επαφής ΑΓ11 β) Τάση επαφής για ενισχυμένο πλέγμα γείωσης της ΑΓ11

Οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις είναι οι εξής:

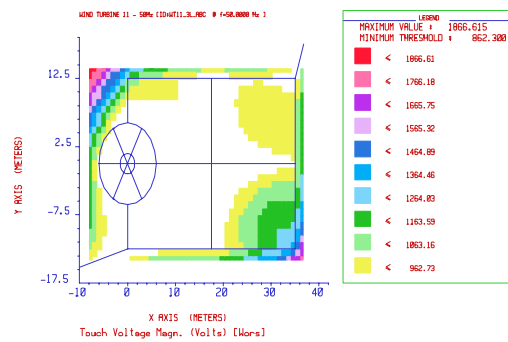
1. Ενίσχυση του πλέγματος, με την προσθήκη του τετραγώνου που περιβάλλει τον εξωτερικό δακτύλιο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5β.
2. Επίστρωση του εδάφους με υλικό επιφανείας (χαλίκι) πάχους 15cm και ειδικής αντίστασης 4000Ωm. Με αυτό τον τρόπο τα όρια για τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις παρουσιάζονται στη τελευταία γραμμή του Πίνακα 2. Το αντίστοιχο γράφημα για τις τάσεις επαφής παρουσιάζεται στη Σχήμα 6α.
3. Κατάλληλη ρύθμιση του εξοπλισμού προστασίας, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος να μειωθεί στα 0,5sec. Το αντίστοιχο γράφημα για τις τάσεις επαφής παρουσιάζεται στη Σχήμα 6β.

Από τα γραφήματα του Σχήματος 6 παρατηρείται ότι στην ανεμογεννήτρια εμφανίζονται, για αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες του 1m (περί τα 6m από την ανεμογεννήτρια), μη επιτρεπτές τιμές τάσεων επαφής. Οι βηματικές τάσεις

που αναπτύσσονται είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.



(α)



(β)

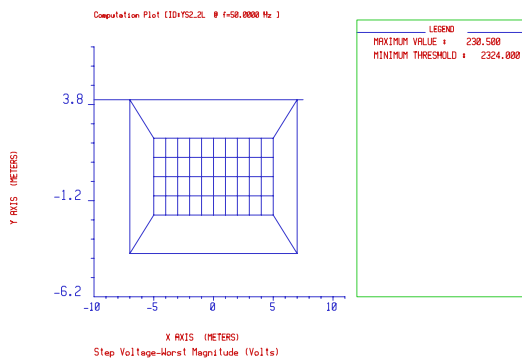
Σχήμα 6: Τάση επαφής α) με προσθήκη επιφανειακού στρώματος χαλκιού, β) για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0.5sec

3^η περίπτωση

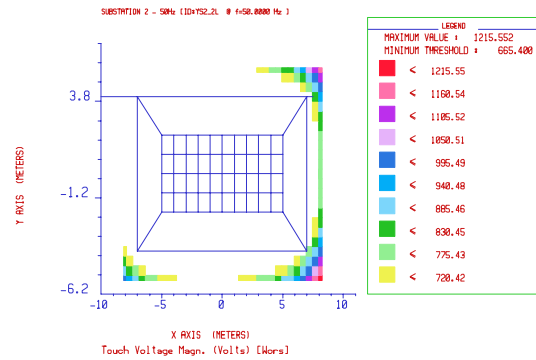
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το πλέγμα γείωσης ενός κέντρου ελέγχου (KE2) διαστάσεως 10×4m, το οποίο ευρίσκεται επί εδάφους με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 3146Ωm, δευτέρου στρώματος 41826Ωm και πάχος πρώτου στρώματος 2,84m. Η αντίσταση γείωσης του κέντρου ελέγχου υπολογίσθηκε 233Ω. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής που αναπτύσσονται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στο αιολικό πάρκο. Στο Σχήμα 7α παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις ενώ στο Σχήμα 7β παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής.

Πίνακας 3: Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής KE2

	0.1 sec		0.25 sec		0.5 sec		1 sec	
	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]	E_{step} [V]	E_{touch} [V]
Χωρίς υλικό επιφανείας	5975	1711	4280	1225	3193	914	2324	665
Με προσθήκη υλικού	6111	1745	4377	1250	3265	932	2377	679

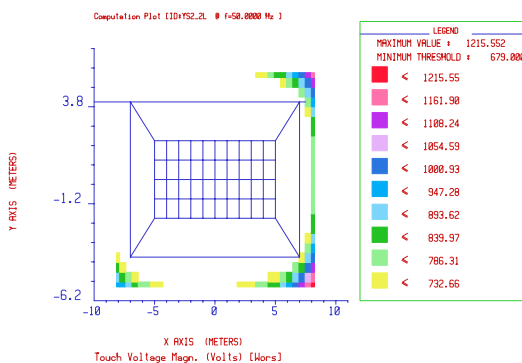


(α)

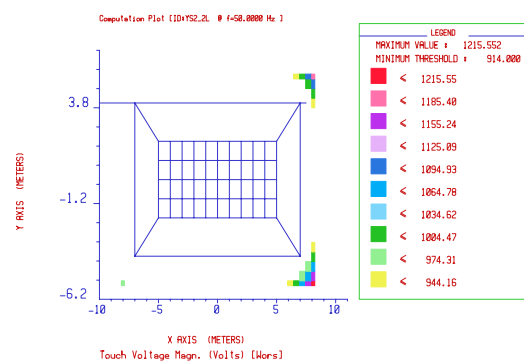


(β)

Σχήμα 7: α) Βηματική τάση κέντρου ελέγχου (KE2), β) Τάση επαφής κέντρου ελέγχου (KE2).



(α)



(β)

Σχήμα 8: Τάση επαφής α) με προσθήκη επιφανειακού στρώματος χαλκιού, β) για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0.5sec

Οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις, ώστε οι τάσεις επαφής που αναπτύσσονται να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, είναι οι εξής:

1. Επιστροφή του εδάφους με υλικό επιφανείας (χαλίκι) πάχους 15cm και ειδικής αντίστασης 4000Ωm. Με αυτό τον τρόπο τα όρια για τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις παρουσιάζονται στη τελευταία γραμμή του Πίνακα 3. Το αντίστοιχο γράφημα για της τάσης επαφής παρουσιάζεται στη Σχήμα 8α.

2. Κατάλληλη ρύθμιση του εξοπλισμού προστασίας, ώστε ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος να μειωθεί στα 0,5sec. Το αντίστοιχο γράφημα για την τάση επαφής παρουσιάζεται στο Σχήμα 8β.

4^η περίπτωση

Στα πλαίσια της μελέτης ασφάλειας του αιολικού πάρκου έχουν ληφθεί υπ' όψιν και δυσμενέστερες (μεγαλύτερες) τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης στην περιοχή (1kA και 2,5kA). Στην περίπτωση που το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 1kA αναπτύσσεται επικίνδυνη τάση μόνο στα συστήματα γείωσης των περιπτώσεων 2 και 3 και η αντιμετώπισή τους είναι ακριβώς η ίδια. Στην περίπτωση, όμως, που το ρεύμα βραχυκύκλωσης γίνει 2,5kA αναπτύσσεται επικίνδυνη τάση επαφής σε πέντε συστήματα γείωσης. Η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης, από το 1sec στα 0,5sec, προσφέρει λύση και στις πέντε περιπτώσεις. Η προσθήκη υλικού επιφανείας προσφέρει λύση μόνο σε τρεις περιπτώσεις, γιατί στις άλλες δύο η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος του εδάφους έχει πολύ υψηλή τιμή (συγκρίσιμη με αυτή του υλικού επίστρωσης). Σ' αυτές τις δύο περιπτώσεις, αν δεν θέλουμε να μειώσουμε το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος, η λύση είναι η επανασχεδίαση του συστήματος γείωσης, με πύκνωση του πλέγματος κοντά στις ανεμογεννήτριες [3].

Σε κανένα από τα 26 συστήματα γείωσης δεν παρατηρήθηκε ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων. Επικίνδυνη βηματική τάση εμφανίζεται σ' ένα σύστημα γείωσης όταν το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπερβεί τα 7kA, ενώ όταν τούτο υπερβεί τα 15kA εμφανίζεται επικίνδυνη βηματική τάση στα μισά συστήματα γείωσης. Ακόμα και σ' αυτήν την τελευταία περίπτωση, όμως, εξαλείφονται οι επικίνδυνες βηματικές τάσεις, εάν ο χρόνος εκκαθάρισης μειωθεί από το 1sec στα 0,5sec.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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. Για το λόγο αυτό, το κύριο ζητούμενο στη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός αιολικού πάρκου είναι η μη ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Με την παρούσα εργασία προτείνεται, όπως το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου χωριστεί σε όλα τα στάδια (μελέτη, κατασκευή, μέτρηση) σε ανεξάρτητα τυπικά συστήματα γείωσης, για λόγους οικονομίας. Τα ανεξάρτητα τυπικά συστήματα γείωσης αφορούν τόσο τα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών, όσο και των κέντρων ελέγχου. Οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται για τη μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος και ένα τυπικό χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Το τελικό κριτήριο στη σχεδίαση δεν πρέπει να είναι μόνο η ελαχιστοποίηση της συνολικής αντίστασης γείωσης του πάρκου, αλλά επιπροσθέτως, και μάλιστα μεγαλύτερης σημασίας, η τήρηση των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής κάτω των επιτρεπτών ορίων ασφαλείας, όπως υπολογίζονται με βάση το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1].

Κατά περιπτώσιν, είναι ενδεχόμενο να κριθεί απαραίτητη η διαφοροποίηση της σχεδίασης κάποιου ή μερικών από τα ανεξάρτητα συστήματα γείωσης, ή η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, όταν στις αντίστοιχες θέσεις (είτε ανεμογεννητριών, είτε κέντρων ελέγχου) οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής υπερβαίνουν, κατ' εξαίρεση, τις επιτρεπτές τιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2000, "*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*", 2000.
- [2] Ιωάννης Φ. Γκόνος, "Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
- [3] Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "*Frequency Response of Grounding Systems for Wind Turbine Generator*", Proceedings of the 14th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China, August 25-29, 2005, paper B-13.
- [4] M.I. Lorentzou, N.D. Hatzargyriou, G.A. Manos, T. Sietis, "*Intergrated grounding system of wind-farms for lightning and fault protection*", MedPower 2004, Lemessos, Cyprus, 15-17 November 2004.
- [5] IEEE Std 81.2-1991, "*IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems*", June 1992.
- [6] IEEE Std 81-1983, "*IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system*", 11 March 1983.
- [7] Aravanis J., Tzouvelekis E., Chronopoulos C., Antoniou T., "*Computing Method of the Equivalent resistivity of non-uniform Soil for the Design of transmission Substation Grounding Grids*", Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003), Thessalonica, Greece, September 1-3, 2003, pp. 709-712.
- [8] Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "*Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms*", IEEE Transactions on Power Delivery, January 2005, pp. 100-106.
- [9] Ma J., Dawalibi F.P., "*Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall-of-potential method*", IEEE Transactions on Power Delivery, 16, 4, October 2001, pp. 739-743.