



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Πειραιώς 45, 105 53, Αθήνα, Τηλ., Fax: 210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

COMITE NATIONAL HELLENIQUE

45, rue Pireos, 105 53, Athenes, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

GREEK NATIONAL COMMITTEE

45, Pireos Str. , 105 53, Athens, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

ΣΥΝΟΔΟΣ "ΑΘΗΝΑ 2011"

15 & 16 Δεκεμβρίου 2011

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Ι.Φ. Γκόνος¹ Ι.Α. Σταθόπουλος¹
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

Ο αυξανόμενος αριθμός αιολικών πάρκων έχει οδηγήσει στην ανάγκη διενέργειας, από ανεξάρτητο φορέα, δοκιμών και μετρήσεων για την παραλαβή των έργων. Η παρούσα εργασία προσπαθεί να συνοψίσει την αποκτηθείσα εμπειρία, από μετρήσεις και δοκιμές σε δεκάδες αιολικά πάρκα και να δώσει κάποιους απλούς κανόνες για τον τρόπο πραγματοποίησής τους. Στην εργασία αυτή, εκτός των στατιστικών στοιχείων από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές και μετρήσεις, παρουσιάζονται προτάσεις που αφορούν: α) στη σειρά και στον τρόπο πραγματοποίησης των δοκιμών, για την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων διορθωτικών εργασιών και β) στα αποδεκτά όρια. Ειδικά, όσον αφορά στην περίπτωση της αντίστασης γείωσης, ελέγχεται ο προβληματισμός, κατά πόσον το ζητούμενο πρέπει να είναι ή τιμή της αντίστασης γείωσης (π.χ. 25Ω ή 10Ω ή 1Ω, κατά περίπτωση) ή οι τιμές των αναπτυσσομένων τάσεων (επαφής και βηματικών).

ELECTRIC MEASUREMENTS AND TEST IN WINDFARMS

I.F. Gonos¹ I.A. Stathopoulos¹
High Voltage Laboratory N.T.U.A.

The continuous development of wind parks, has led to the need of carrying out several tests and measurements, by an independent organization, for the technical inspection of the constructions. It is the aim of this study to sum up the experience obtained, from tests and measurements carried out in a large number of wind parks, and to formulate some simple rules about the procedure. Besides the statistics obtained from these measurements, this paper presents some proposals about: a) the sequence and the way how to perform these tests, in order to minimize the necessary corrections, b) the acceptance limits. More specifically, for grounding resistance, a controversy is presented and discussed about the objective of the test, if grounding resistance value should be considered (e.c. 25Ω, 10Ω, 1Ω), or the step, resp. touch voltage.

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, stathop@power.ece.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση των αιολικών πάρκων δημιουργεί μία σειρά ερωτημάτων στις εταιρείες, που σχεδιάζουν και κατασκευάζουν τα σχετικά έργα, ως προς τις δοκιμές και μετρήσεις, που θα πρέπει να πραγματοποιούνται, κατά το στάδιο της κατασκευής, αλλά και της παραλαβής των έργων. Τα έργα αυτά, για να καθιερωθούν, αλλά και για να αποκτήσουν σταθερή παραγωγή και εγγυημένη βιωσιμότητα, χρειάζεται να χαρακτηρίζονται από: α) οικονομίες κλίμακας και β) κοινές διαδικασίες ελέγχου του τελικού έργου.

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με τη χρήση των διεθνών Προτύπων [1, 2], τόσο στο στάδιο της σχεδίασης, όσο και σ' αυτό των δοκιμών και μετρήσεων. Τα Πρότυπα αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη διάδοση νέων τεχνολογιών και καλών πρακτικών, την ανάπτυξη υποστήριξη και εναρμόνιση των διεθνών αγορών. Η χρήση των Προτύπων αποτελεί αναγκαιότητα, γιατί καλύπτουν τις ανάγκες δοκιμών και πιστοποίησης της αυξανόμενης διεθνούς αγοράς ανανεώσιμης ενέργειας, παρέχοντας τις απαραίτητες μεθοδολογίες και τα απαιτούμενα εργαλεία, ώστε να διασφαλίζουν ότι, τόσο υφιστάμενα, όσο και νέα έργα, καλύπτουν τις προσδοκίες των επενδυτών, αλλά και των χρηστών.

Ο αυξανόμενος αριθμός αιολικών πάρκων έχει οδηγήσει στην ανάγκη διενέργειας, από ανεξάρτητο φορέα, των απαραίτητων δοκιμών και μετρήσεων για την παραλαβή των έργων. Η παρούσα εργασία προσπαθεί να συνοψίσει την αποκτηθείσα εμπειρία, από μετρήσεις και δοκιμές σε δεκάδες αιολικά πάρκα και να δώσει κάποιους απλούς κανόνες για τον τρόπο πραγματοποίησής τους. Οι μετρήσεις και οι δοκιμές πρέπει να γίνονται [1]:

- με αδιάβλητο τρόπο, σύμφωνα με τα ισχύοντα Πρότυπα,
- από κατάλληλα, ανεξάρτητα, διαπιστευμένα Εργαστήρια,
- με χρήση κατάλληλου, διακριβωμένου εξοπλισμού.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις για τα εργαστήρια δοκιμών και μετρήσεων πρέπει να αφορούν στην εμπειρία και εξειδίκευση στις επιτόπιες μετρήσεις και δοκιμές. Αυτό αποδεικνύεται με σχετική διαπίστευση [1]. Στη χώρα μας υπάρχουν δώδεκα διαπιστευμένα, από το ΕΣΥΔ, εργαστήρια που έχουν στο πεδίο διαπίστευσης ηλεκτρικές δοκιμές και μετρήσεις. Η διαπίστευση αφορά μόνο στις δοκιμές και μετρήσεις που περιλαμβάνονται στο πεδίο διαπίστευσης. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι, ένα εργαστήριο, που είναι διαπιστευμένο να μετρά ειδική αντίσταση εδάφους με τη μέθοδο Wenner [3], δεν σημαίνει ότι έχει, κατ' ανάγκην, και διαπίστευση για τη μέτρηση αντίστασης γείωσης σε εκτεταμένα συστήματα γείωσης [4]. Ελλείψει της διαπίστευσης, για μία συγκεκριμένη δοκιμή και μέτρηση αυτής, από οποιοδήποτε ελληνικό εργαστήριο, εύλογη είναι η ανάθεση της εν λόγω μέτρησης σε εργαστήρια με αποδεδειγμένη εμπειρία-εξειδίκευση στις μετρήσεις αυτές. Τα αντίστοιχα πιστοποιητικά θα πρέπει να συνοδεύονται από αναλυτική παρουσίαση του σχετικού εξοπλισμού του εργαστηρίου, με τις αντίστοιχες διακριβώσεις του, καθώς και του εμπλεκόμενου προσωπικού (και των προσόντων αυτού). Η πιστοποίηση των εργαστηρίων, κατά ΕΛΟΤ ISO EN 9001 [2], δεν εξασφαλίζει την τεχνική επάρκεια των εργαστηρίων, αλλά, μόνον, την ύπαρξη ενός συστήματος ποιότητας, το οποίο, πολλές φορές, δεν σχετίζεται με τις δοκιμές και μετρήσεις που πραγματοποιούν.

Οι μετρήσεις, που παρουσιάζονται, πραγματοποιούνται, για περισσότερο από μία δεκαετία, από το, διαπιστευμένο κατά ΕΛΟΤ EN 17025 [1] και πιστοποιημένο κατά ΕΛΟΤ ISO EN 9001 [2], Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και είναι:

- Μέτρηση ειδικής αντίστασης του εδάφους,
- Μέτρηση αντίστασης γείωσης,
- Δοκιμή αντοχής μανδύα καλωδίων μέσης τάσης (με dc τάση),
- Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής καλωδίων μέσης τάσης (με VLF τάση),
- Μέτρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (ELF).

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

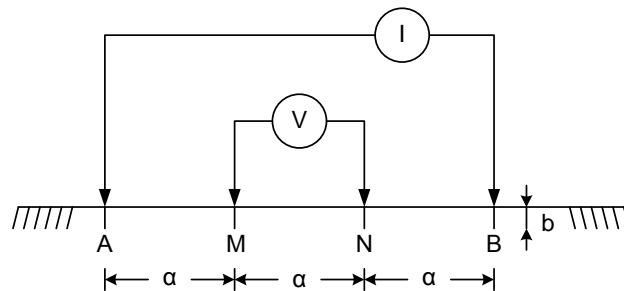
Το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου πρέπει να εξασφαλίζει την προστασία, τόσο των ατόμων, που βρίσκονται σ' αυτό, όσο και του εξοπλισμού, κατά την περίπτωση βραχυκυκλώματος. Για το λόγο αυτό, το κύριο ζητούμενο στη μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου είναι η μη ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Για τον υπολογισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων, πρέπει να είναι γνωστή η ειδική αντίσταση του εδάφους, της οποίας η συνεισφορά στη διαμόρφωση της τελικής τιμής της αντίστασης γείωσης είναι σημαντικότερη. Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν προταθεί πολλές τεχνικές [3-5]. Οι κυριότερες από αυτές είναι [6] α) η μέθοδος Wenner, β) η μέθοδος Schlumberger, γ) η μέθοδος των διπόλων, δ) ο εναλλασσόμενος σχηματισμός και ε) η μέθοδος της μέτρησης της αντίστασης γείωσης.

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Wenner [3], η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά από όλες τις άλλες, απαιτούνται τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα σε ευθεία γραμμής και ισαπέχοντα το ένα από το άλλο απόσταση a (Σχήμα 1). Τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια εμφυτεύονται με το κάτω άκρο τους μερικώς στο έδαφος, ενώ το άνω άκρο τους συνδέεται σε ένα μετρητικό όργανο, το γειωσόμετρο. Το ρεύμα εγχέεται μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων και μετρείται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [3]:

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

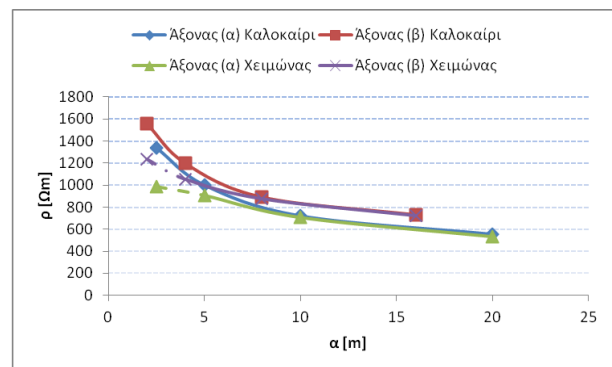
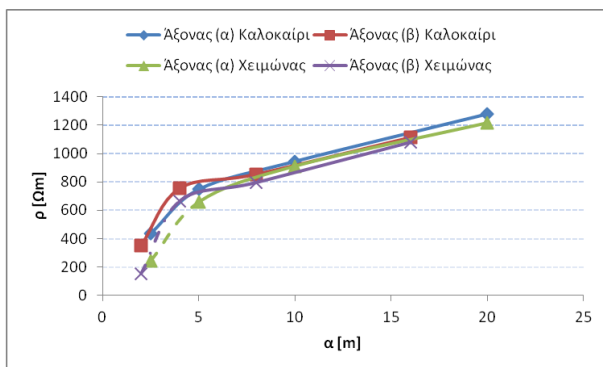
όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου), a η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και b το βάθος στο οποίο έχουν εμφυτευθεί τα ηλεκτρόδια. Όταν $a \gg b$, τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2)$$



Σχήμα 1: Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

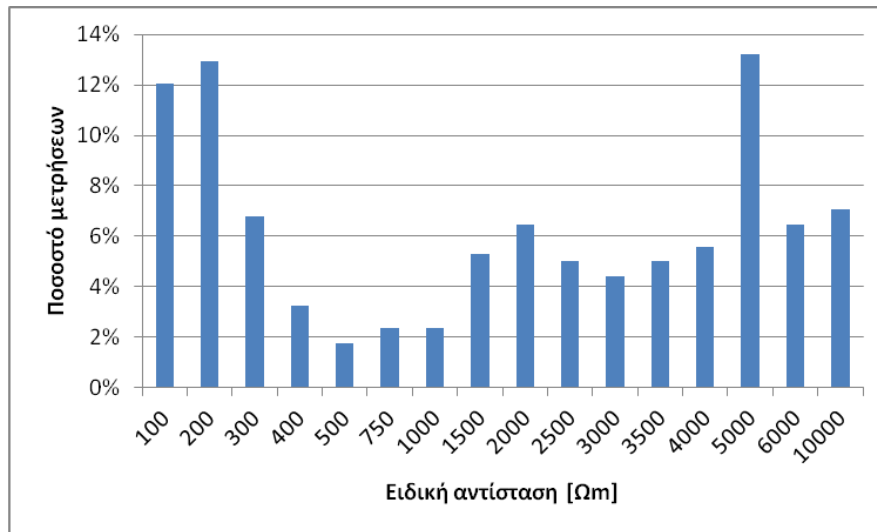
Η τιμή της ειδικής αντίστασης μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου και της θέσης του άξονα και του βάθους ($a/2$) μέτρησης. Αυτό απαιτεί, για κάθε πλατεία ανέγερσης ανεμογεννητριών, την επανάληψη των μετρήσεων, σε περισσότερους άξονες, αποστάσεις και εποχές. Για τη σωστή εκτίμηση της πολυστρωματικής δομής του εδάφους πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις σε πέντε τουλάχιστον αποστάσεις (διαφορετικά a). Οι αποστάσεις μέτρησης προτείνεται να κυμαίνονται από $a=2$ έως $a=20m$. Για την αντιπροσωπευτική αναπαράσταση του εδάφους της πλατείας, όπου θα ανεγερθεί η ανεμογεννήτρια, πρέπει να είναι δύο, τουλάχιστον, οι διαφορετικοί άξονες, στους οποίους πραγματοποιούνται μετρήσεις. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συναρτήσει του βάθους (το βάθος ισούται με το μισό της απόστασης μέτρησης a), της εποχής του έτους και του άξονα μέτρησης.



α) Η ειδική αντίσταση αυξάνει συναρτήσει της απόστασης β) Η ειδική αντίσταση μειώνεται συναρτήσει της απόστασης
Σχήμα 2: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ) συναρτήσει της απόστασης (a) και της εποχής μέτρησης

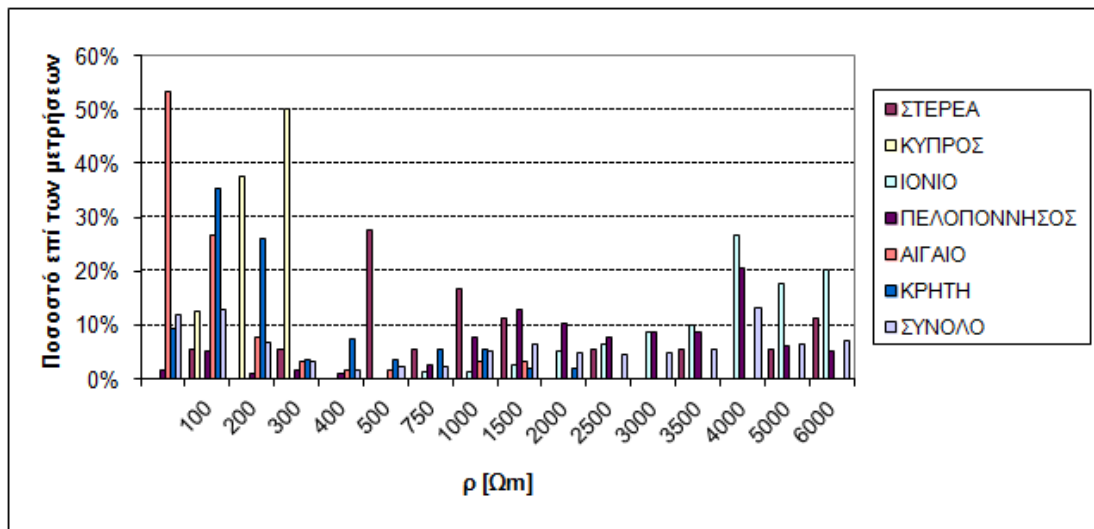
Μετρήσεις ειδικής αντίστασης, οι οποίες διεξήχθησαν, την τελευταία δεκαετία, σε αιολικά πάρκα μπορούν να κατηγοριοποιήσουν τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 (συνολικά στη χώρα) και 4 (αναλυτικά ανά περιοχή). Το 37% των εδαφών που μετρήθηκαν είχε ειδική αντίσταση μικρότερη των $500\Omega m$. Το 21% των εδαφών που μετρήθηκαν είχε ειδική αντίσταση με τιμή μεταξύ $500\Omega m$ και $2500\Omega m$. Το 42% των εδαφών που μετρήθηκαν είχε ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των $2500\Omega m$. Η κατηγοριοποίηση αυτή των εδαφών οδηγεί σε διαφορετική αντιμετώπιση της σχεδίασης των συστημάτων γείωσης των ανεμογεννητριών [6]. Τα εδάφη χαμηλής ειδικής αντίστασης θα μας δώσουν μονοψήφια αντίσταση γείωσης, αλλά θα έχουν χαμηλές τιμές μέγιστης επιτρεπόμενης βηματικής τάσης και τάσης επαφής

[5, 6]. Οι υπερβάσεις στα όρια των τάσεων εξαλείφονται με τη χρήση υλικού επιφανείας (χαλίκι). Το υλικό επιφανείας δεν προσφέρει καμία βελτίωση στις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από 2500Ωm. Σ' αυτήν την περίπτωση, η αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης αποτελεί μονόδρομο, για τη μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, που ανέρχεται σε δεκάδες Ω.



Σχήμα 3: Μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους στην Ελλάδα (2002-2011)

Στο Σχήμα 4 είναι φανερή η διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ των διαφόρων περιοχών της χώρας: τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη διαθέτουν εδάφη με χαμηλή ειδική αντίσταση, ενώ η Πελοπόννησος και τα νησιά του Ιονίου έχουν εδάφη με τις υψηλότερες τιμές. Αυτό μας οδηγεί στη σχεδίαση διαφορετικού είδους και μεγέθους συστημάτων γείωσης, ανάλογα με την περιοχή, όπου θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 4: Μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους ανα περιοχή (2002-2011)

Συνηθισμένα σφάλματα κατά τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης στα αιολικά πάρκα είναι:

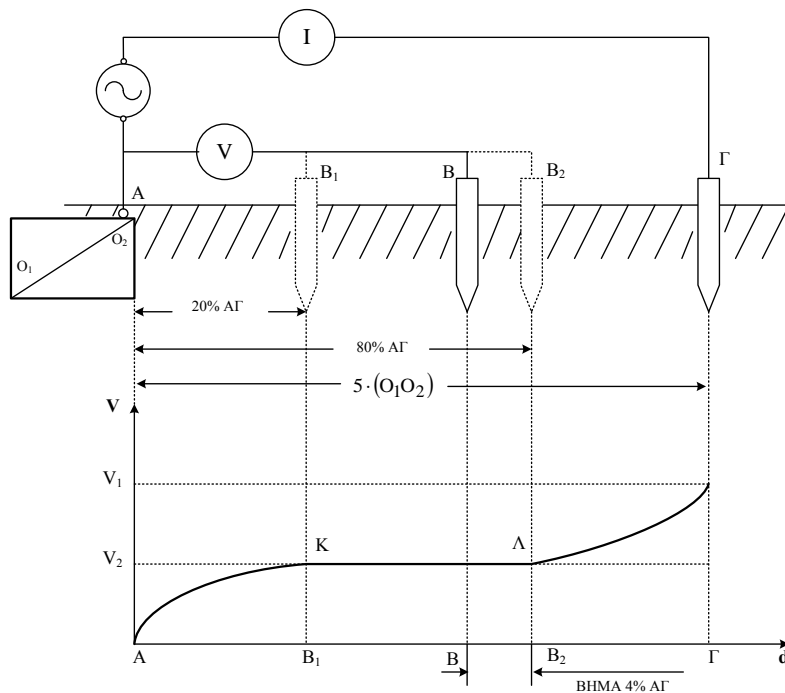
- η μέτρηση γίνεται αμέσως μετά από βροχή, με συνέπεια τη λάθος εκτίμηση της τιμής του άνω στρώματος του εδάφους. Στο Σχήμα 2 παρατηρείται έντονη μεταβολή της ειδικής αντίστασης, για μικρές αποστάσεις μέτρησης ($a < 2m$), μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών μετρήσεων.
- λάθος επιλογή θέσης μέτρησης, από την ομάδα μέτρησης. Εάν δεν είναι χαραγμένη η θέση της πλατείας, μπορεί να γίνουν οι μετρήσεις σε διπλανή περιοχή με πιο εύκολη πρόσβαση, αλλά, πολλές φορές, διαφορετική δομή του εδάφους
- η μέτρηση γίνεται σε έδαφος που
 - είναι παγωμένο, οπότε προκύπτουν τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές [5].
 - έχει τοποθετημένο υλικό επιφανείας, οπότε προκύπτουν «διαφορετικές τιμές» για μικρές αποστάσεις μέτρησης.
 - έχει τοποθετηθεί το σύστημα γείωσης, οπότε προκύπτουν τιμές μικρότερες από τις πραγματικές.

Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην απόφαση για τη χρήση ή όχι υλικού επιφανείας, για την αύξηση των μέγιστων επιτρεπόμενων αναπτυσσόμενων τάσεων.

- δ) το πλήθος των αξόνων μέτρησης και των αποστάσεων a δεν επαρκούν για την αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της δομής του εδάφους. Η επιλογή των αποστάσεων a συνιστάται να είναι διαφορετική ανά άξονα, γιατί, έτσι, ελαχιστοποιείται το σφάλμα μοντελοποίησης.
- Για την περίπτωση της μονοστρωματικής δομής του εδάφους, οι τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις a είναι επαρκείς
 - Για την περίπτωση της διστρωματικής δομής του εδάφους, πέντε διαφορετικές αποστάσεις του a είναι απαραίτητες, για μοντελοποίηση με εμπορικά πακέτα λογισμικού (π.χ., CDEGS, CYMGRID, κ.λπ.).
 - Για τη περίπτωση της πολυστρωματικής δομής του εδάφους, οκτώ διαφορετικές αποστάσεις του a είναι απαραίτητες, για μοντελοποίηση με το λογισμικό CDEGS.
- ε) το πλήθος των αξόνων μέτρησης και των αποστάσεων a δεν επαρκούν για τη σωστή σχεδίαση του συστήματος γείωσης (σε οριζόντια ή και κατακόρυφη διάταξη). Εάν, για τα εδάφη του Σχήματος 2, δεν είχαμε κάνει όλες τις μετρήσεις (πλήθος αξόνων και αποστάσεις a) που παρουσιάζονται, δεν θα μπορούσαμε να αποφασίσουμε σωστά για τη χρήση κατακόρυφων ηλεκτροδίων.
- Στο Σχήμα 2α, τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια, που συνδέονται στο σύστημα γείωσης, δεν συμβάλλουν στη μείωση της αντίστασης γείωσης, γιατί η αύξηση του βάθους εμφύτευσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, οδηγεί σε έδαφος μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης (στην περίπτωση αυτή ενδείκνυται η αύξηση της οριζόντιας επιφάνειας του συστήματος γείωσης), ενώ
 - στο Σχήμα 2β τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια συμβάλλουν στη μείωση της αντίστασης του συστήματος γείωσης (το έδαφος αποκτά μικρότερη ειδική αντίσταση, καθώς αυξάνει το βάθος εμφύτευσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων).

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η μέτρηση της αντίστασης γείωσης συνιστάται στη μέτρηση της αντίστασης του όγκου του εδάφους, στο οποίο περιλαμβάνεται 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 καθορίζεται, κατά 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 με πιθανότητα 98% η τιμή της αντίστασης γείωσης να βρίσκεται εντός της καθορισμένης περιοχής [3-7].

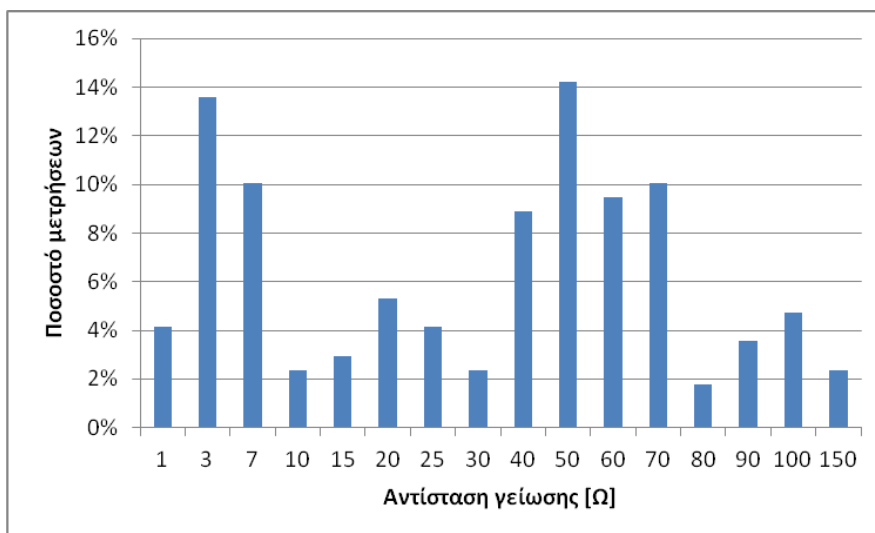


Σχήμα 5: Μέτρηση αντίστασης γείωσης

Μια πρακτική και αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης της αντίστασης γείωσης είναι αυτή της «πτώσης δυναμικού» [3-7], η οποία βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης δυναμικού κατά μήκος του εδάφους, που προκαλείται από ένα ρεύμα που εγχέεται στο έδαφος σε κάποιο άλλο σημείο. Για τη μέτρηση των γειώσεων χρησιμοποιούνται δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια και πραγματοποιείται η συνδεσμολογία του Σχήματος 5, όπου Α είναι το προς έλεγχο σύστημα γείωσης, Β, δε, 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 μεταξύ του Α και του δευτέρου βοηθητικού ηλεκτροδίου (τάσεως) Β, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (ρεύματος) Γ.

Για τον έλεγχο (μέτρηση της αντίστασης γείωσης) των σημειακών γειώσεων, το ηλεκτρόδιο Γ τοποθετείται σε απόσταση 30 έως 50m από το σημείο Α, ενώ το Β σε απόσταση $AG/2$. Με αυτήν τη διάταξη λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση και, κατόπιν, λαμβάνονται 2 έως 6 μετρήσεις, μετακινώντας το Β πάνω στην ευθεία ΑΓ. Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι πολύ μικρή, γίνεται δεκτή ως αντίσταση του γειωτή Α, ο μέσος όρος των πραγματοποιηθεισών μετρήσεων. Σε αντίθετη περίπτωση, μεγαλώνει η απόσταση ΑΓ και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις, όπως προηγουμένως. Οι μετρήσεις θεωρούνται ικανοποιητικές, όταν οι τιμές τους διαφέρουν μεταξύ τους μέσα σε αποδεκτά όρια. Στη γραφική παράσταση του Σχήματος 5 απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού εντός του εδάφους μεταξύ του γειωτή Α και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ. Στην περιοχή όπου το δυναμικό 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 της καμπύλης είναι 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 [3, 4]. Το πρότυπο IEEE 81.2 [4] 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 [4]. 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. Επομένως, για ανεμογεννήτριες με μόνο το θεμελιακό σύστημα γείωσης (διάμετρος βάσης μικρότερη των 20m) απαιτείται απόσταση ΑΓ=100m. Στην περίπτωση που το σύστημα γείωσης έχει και επέκταση στην πλατεία τότε η απόσταση αυξάνει σε τουλάχιστον ΑΓ=200m.

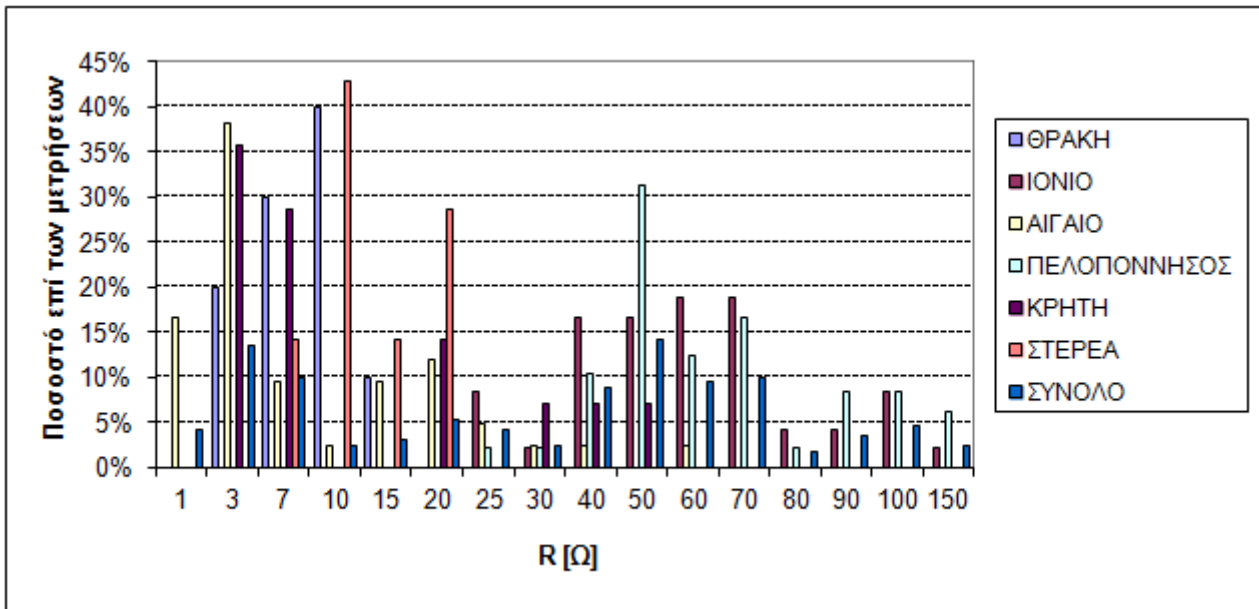


Σχήμα 6: Μετρήσεις αντίστασης γείωσης ανεμογεννητριών στην Ελλάδα 2002-2011

Στα Σχήματα 6 (συνολικά) και 7 (αναλυτικά ανά περιοχή) παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, οι μετρήσεις αντίστασης γείωσης ανεμογεννητριών, οι οποίες διεξήχθησαν την τελευταία δεκαετία. Παρατηρείται ότι, μόνο το 4% των ανεμογεννητριών διαθέτει αντίσταση γείωσης με τιμή μικρότερη από 1Ω. Υπάρχει, επιπλέον, ένα 26% των ανεμογεννητριών, των οποίων η τιμή αντίστασή τους μετρήθηκε μεταξύ 1Ω και 10Ω. Στο 12% των ανεμογεννητριών η αντίστασή τους μετρήθηκε μεταξύ 10Ω και 25Ω. Στο 25% των ανεμογεννητριών η αντίστασή τους μετρήθηκε μεταξύ 25Ω και 50Ω. Στο 21% των ανεμογεννητριών η αντίστασή τους μετρήθηκε μεταξύ 50Ω και 80Ω. Τέλος, στο 11% των ανεμογεννητριών η αντίστασή τους μετρήθηκε μεταξύ

80Ω και 150Ω. Οι εταιρείες κατασκευής ανεμογεννητριών ζητούν τιμή αντίστασης γείωσης μικρότερη των 10Ω. Από τις ανεμογεννήτριες (πλέον των 350) που έχει μετρήσει το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, μόνο το 30% καλύπτει αυτό το κριτήριο ($R < 10\Omega$). Αν η τιμή αυξηθεί στα 25Ω, όριο που έχει τεθεί για πυλώνες του συστήματος μεταφοράς, το 42% καλύπτει αυτό το κριτήριο ($R < 25\Omega$). Η αντίσταση του αιολικού πάρκου προκύπτει ως ο παράλληλος συνδυασμός όλων των επιμέρους συστημάτων γείωσης των μεμονωμένων ανεμογεννητριών του πάρκου. Τούτο, σε συνδυασμό με το πλήθος των ανεμογεννητριών του πάρκου, οδηγεί σε μονοψήφια αντίσταση γείωσης για το πάρκο, γεγονός το οποίο, όμως, αφορά στο βραχυκύκλωμα και όχι στον κεραυνό, λόγω της έννοιας του «ενεργού μήκους» γειωτού, ο κεραυνός «βλέπει» μόνο το σύστημα γείωσης της ανεμογεννήτριας που πλήττει. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, μπορεί να φθάσει και στη διπλανή ανεμογεννήτρια (όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη των 100m, περίπου).

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι, το τελικό κριτήριο στην παραλαβή ενός συστήματος γείωσης δεν πρέπει να είναι μόνο η ελαχιστοποίηση της συνολικής αντίστασης γείωσης, αλλά, επιπροσθέτως, και μάλιστα είναι μεγαλύτερης σημασίας, η τήρηση των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής κάτω των επιτρεπών ορίων ασφαλείας, όπως υπολογίζονται με βάση το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [5]. Για να γνωρίζουμε τις μέγιστες επιτρεπτές τάσεις, πρέπει να έχει προηγηθεί η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ακολουθούμενη από την κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος γείωσης [6]. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου π.χ. μία ανεμογεννήτρια διαθέτει σύστημα γείωσης με τιμή 9Ω και σ' αυτό αναπτύσσονται επικίνδυνες τάσεις επαφής ενώ άλλη ανεμογεννήτρια (του ίδιου αιολικού πάρκου) έχει σύστημα γείωσης με δεκαπλάσια αντίσταση το οποίο είναι ασφαλές, είτε γιατί υπάρχει κατάλληλο υλικό επιφανείας, είτε γιατί διαθέτει πυκνό πλέγμα γείωσης. Τότε, είναι απαραίτητη η σωστή, ανεξάρτητη και αδιάβλητη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους και της αντίστασης γείωσης, για την επιβεβαίωση της μελέτης γείωσης, που θα πρέπει να έχει εκπονηθεί με χρήση κατάλληλου λογισμικού.



Σχήμα 7: Μετρήσεις αντίστασης γείωσης ανεμογεννητριών ανά περιοχή της Ελλάδας, 2002-2011

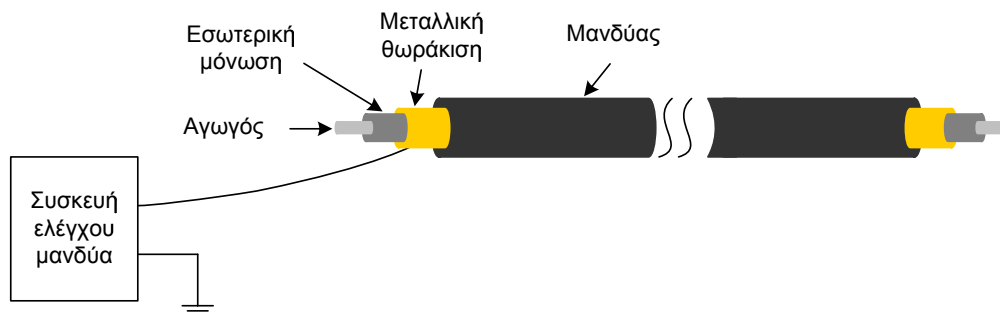
Σε πολλά αιολικά πάρκα, οι «μετρούμενες» τιμές της αντίστασης γείωσης είναι υπερβολικά μικρότερες από τις πραγματικές. Πολλές φορές αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αντί για μέτρηση έχουμε υπεύθυνη δήλωση από τον μηχανικό του εργολάβου ότι, οι αντιστάσεις των συστημάτων γείωσης των ανεμογεννητριών είναι μικρότερες του 1Ω ή των 10Ω, που συνιστάται στο [8]. Επομένως, απαραίτητη προϋπόθεση για ένα «πιστοποιητικό» είναι η περιγραφή της μεθοδολογίας και του εξοπλισμού, καθώς και η πραγματοποίηση της μέτρησης από ανεξάρτητο εργαστήριο. Συνηθισμένα λάθη, κατά τη διαδικασία μέτρησης, είναι:

- λάθος επιλογή της απόστασης ΑΓ. Πολλές φορές επιλέγεται απόσταση 40m αντί του σωστού 6.5πλασίου της μέγιστης διάστασης του συστήματος γείωσης (που μπορεί να είναι >200m). Η μικρότερη απόσταση δίνει χαμηλότερες τιμές.
- δεν έχει υπάρξει πρόβλεψη για φρεάτιο (στο διασυνδεδετικό αγωγό) αποσύνδεσης των συστημάτων γείωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αντί να μετράται η αντίσταση γείωσης της ανεμογεννήτριας, να μετράται αυτή του αιολικού πάρκου.
- ενώ έχει γίνει αποσύνδεση των συστημάτων γείωσης, μέσω των φρεατίων, υπάρχει σύνδεση μέσω της θωράκισης των καλωδίων μέσης τάσης.

δ) λάθος επιλογή άξονα μέτρησης. Η μέτρηση πρέπει να γίνεται κάθετα στον άξονα ανάπτυξης του έργου. Πολλές φορές, για λόγους ταχύτητας ή ευκολίας πρόσβασης, οι μετρήσεις γίνονται παράλληλα με το δρόμο που συνδέει τις ανεμογεννήτριες μεταξύ τους. Εκεί υπάρχει όμως όδευση του διασυνδεδετικού αγωγού, με αποτέλεσμα τούτο να επιδρά στην μέτρηση και να δίνει, ψευδώς, μικρότερη τιμή αντίστασης γείωσης από την πραγματική.

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΑΛΩΔΙΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Τα καλώδια μέσης τάσης δοκιμάζονται μετά την εγκατάσταση [9-12] με συνεχή τάση, για τον έλεγχο του μανδύα. Η συνεχής υψηλή τάση, που εφαρμόζεται μεταξύ της μεταλλικής θωράκισης και της γης, έχει τιμή 3kV, εάν ο μανδύας του καλωδίου είναι από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και 5kV, εάν είναι από πολυαιθυλένιο (PE). Ο χρόνος εφαρμογής της τάσης πρέπει να είναι, τουλάχιστον, 1min, ενώ κριτήριο για την επιτυχή απόληξη της δοκιμής είναι η μη εμφάνιση διάσπασης (διάτρησης) του μανδύα (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Πειραματική διάταξη ελέγχου μανδύα με συνεχή τάση

Ο έλεγχος του μανδύα πρέπει να γίνεται στο αρχικό στάδιο τοποθέτησης του καλωδίου. Αφού το καλώδιο σκεπαστεί με άμμο (πριν τοποθετηθούν ακροκιβώτια και σύνδεσμοι [μούφες]) γίνεται ο πρώτος έλεγχος του μανδύα. Εάν το αποτέλεσμα είναι θετικό, τότε προχωράμε στην ολοκλήρωση τοποθέτησης του καλωδίου, με πλήρωση, με κατάλληλα υλικά, του αντιστοιχού σκάμματος όδυσής του. Διαφορετικά, προχωράμε σε εντοπισμό του σημείου ή των σημείων αστοχίας του καλωδίου, έως ότου επιτευχθεί το θετικό αποτέλεσμα. Η δοκιμή του ελέγχου του μανδύα επαναλαμβάνεται, πριν την τελική παράδοση του αιολικού πάρκου. Στη δοκιμή αυτή παρατηρούνται τα περισσότερα σφάλματα των καλωδίων. Τα σφάλματα αυτά, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90%, οφείλονται:

α) σε κακή τοποθέτηση του καλωδίου γιατί:

- δεν έχει χρησιμοποιηθεί άμμος, για να σκεπάσει τα καλώδια ή
- τα καλώδια τοποθετήθηκαν στα χαντάκια και δεν σκεπάστηκαν αμέσως με άμμο, με αποτέλεσμα να χτυπηθούν από πέτρες που έπεσαν μέσα στα ανοιχτά χαντάκια ή
- δεν έχει γίνει σωστό πέρασμα των καλωδίων κάθετα των δρόμων του πάρκου ή
- τα καλώδια έχουν τοποθετηθεί υπό συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα τη φθορά τους.

β) Ένα μικρό ποσοστό σφαλμάτων οφείλεται σε:

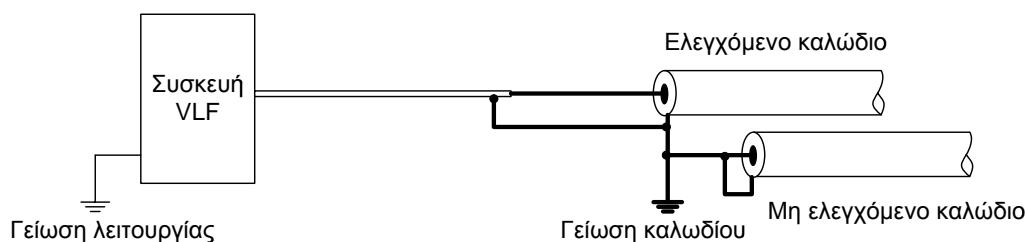
- κατασκευαστικά ελαττώματα των καλωδίων ή
- σε τρώση (πλήγωμα) του καλωδίου, κατά τη μεταφορά του από το εργοστάσιο στο χώρο του πάρκου.

Η δοκιμή ελέγχου του μανδύα είναι πολύ απλή στην πραγματοποίησή της και ο εξοπλισμός (ένα μονοσιώμετρο αρκεί για τους αρχικούς ελέγχους) δεν κοστίζει ακριβά. Τα λάθη που γίνονται σ αυτή τη δοκιμή είναι:

- α) μη σωστή επιλογή της τάσης. Έχει καταγραφεί περίπτωση, κατά την οποία οι δοκιμές έγιναν με τάση μικρότερη, ακόμα και, από 500V
- β) μη σύνδεση του ακροδέκτη επιστροφής στον αγωγό γείωσης, που «τρέχει» παράλληλα με τα καλώδια, αλλά με τη θωράκιση κάποιας από τις άλλες φάσεις ή τον αγωγό της ελεγχόμενης φάσης
- γ) ελεγκτής και ελεγχόμενος είναι το ίδιο πρόσωπο (εργολάβος εγκατάστασης), οπότε τα καλώδια με σφάλματα, να μην βρίσκονται, αλλά δεν εντοπίζονται οι θέσεις των σφαλμάτων και δεν πραγματοποιείται αποκατάσταση αυτών.

Είναι απαραίτητος ο έλεγχος των καλωδίων, πριν την οριστική παραλαβή και λειτουργία τους, με τη χρήση της νέας μεθοδολογίας εναλλασσόμενης τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον η εγκατάσταση έγινε σωστά και να προληφθούν τυχόν σφάλματα, που ενδεχομένως

θα εμφανιστούν, κατά τη λειτουργία των καλωδίων. Καλώδια με μηχανικές βλάβες και υδάτινους δενδρίτες παρουσιάζουν σφάλματα («σκάνε») στην ίδια, περίπου, τάση, είτε με τάση VLF, είτε με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας. Στα εγκατεστημένα καλώδια, πραγματοποιείται η δοκιμή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης, με εναλλασσόμενη τάση $2U_0$ ή VLF τιμής $3U_0$ [12], όπου U_0 η ονομαστική φασική τάση του καλωδίου [11-14]. Η πραγματοποίηση των δοκιμών με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας απαιτεί συσκευές μεγάλης ισχύος και όγκου, οι οποίες παρουσιάζουν δυσκολίες στη μεταφορά και υψηλό κόστος. Ένα καλώδιο μεγάλου μήκους έχει υψηλή χωρητικότητα. Ο μόνος πρακτικός τρόπος να δοκιμαστούν υψηλές χωρητικότητες με εναλλασσόμενη τάση είναι να χρησιμοποιήσουμε εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), συνήθως 0,1Hz [13-14]. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα, τόσο πιο μικρό είναι το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή υψηλών χωρητικότητων. Η τάση διάσπασης για «υγιές» καλώδιο είναι αρκετά μεγαλύτερη στα 0,1Hz, απ' όσο στα 50Hz, αλλά η τιμή της, για τις δύο αναφερθείσες συχνότητες, δεν διαφέρει σημαντικά, για καλώδια με μηχανικές βλάβες και υδάτινους δενδρίτες [15]. Οι συσκευές VLF που διατίθενται από διάφορες εταιρείες έχουν δυνατότητα παροχής τάσης, συχνότητας 0,1Hz ή και μικρότερης, από 25kV έως 200kV, ενώ τα επίπεδα των χωρητικότητων των καλωδίων, που μπορούν να δοκιμαστούν με μια συσκευή VLF, είναι 0,4μF – 50μF. Στο Σχήμα 9 φαίνεται η συνδεσμολογία της διάταξης για τη δοκιμή αντοχής VLF.



Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη δοκιμών καλωδίων με VLF τάση

Σκοπός της δοκιμής VLF είναι να διαπιστωθεί κατά πόσον η εγκατάσταση του υπό έλεγχο καλωδίου έγινε με επιτυχία, οπότε το καλώδιο μπορεί να ηλεκτριστεί χωρίς πρόβλημα. Αναλυτικότερα ελέγχονται τα εξής :

- αν το καλώδιο κατά την εγκατάσταση του έχει υποστεί μηχανικές καταπονήσεις, που μπορεί να έχουν επίδραση στην ηλεκτρική του συμπεριφορά και, συγκεκριμένα, να έχουν προκαλέσει αλλοίωση των μονωτικών ιδιοτήτων της μόνωσης.
- αν η τοποθέτηση των ενδιάμεσων συνδέσμων ('μούφες') και των ακροκιβωτίων τερματισμού έγινε με επιτυχία, ώστε το καλώδιο, στο σύνολό του, να λειτουργήσει σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Κανονισμοί που αναφέρονται στις δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας είναι αυτοί της CENELEC [12] και της IEEE [13, 14]. Οι παραπάνω κανονισμοί απαγορεύουν τη χρήση υψηλής συνεχούς τάσης σε καλώδια μέσης τάσης με πλαστική μόνωση, διότι όπως έχει αποδειχθεί η εφαρμογή συνεχούς τάσης:

- δεν ανιχνεύει την παρουσία πολλών τύπων αλλοίωσης μόνωσης και δεν εξασφαλίζει ότι, σφάλματα που έχουν ξεκινήσει να σχηματίζονται, δεν θα εκδηλωθούν την ώρα της δοκιμής,
- ενεργοποιεί πολλαπλές εστίες δημιουργίας νέων σφαλμάτων, λόγω της παρατεταμένης εφαρμογής ισχυρών φορτίων μιας πολικότητας. Οι εστίες αυτές είναι, συνήθως, ξένα σωματίδια και μικροκοιλότητες, που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία έκχυσης του θερμοπλαστικού μονωτικού υλικού.

Αντιθέτως, έχει, πλέον, αποδειχθεί [11-15] ότι, η εφαρμογή τάσης VLF σε καλώδια με πλαστική μόνωση είναι η πλέον αποτελεσματική και δεν προκαλεί καμία απολύτως καταπόνηση στο μονωτικό υλικό.

Η δοκιμή VLF δεν είναι καταστρεπτική για μόνωσεις, που βρίσκονται σε καλή κατάσταση, ενώ δεν προκαλεί επιπλέον φθορές στη μόνωση. Σε περίπτωση που η μόνωση περιέχει θέσεις φθοράς, ανομοιογένειας και υδάτινους δενδρίτες, η μόνωση διασπάται, πράγμα το οποίο επιδιώκεται, αφού, εάν μια μόνωση δεν μπορεί να αντέξει τάση 2-3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής, δεν θα αντέξει για πολύ, ευρισκόμενη σε λειτουργία. Είναι προτιμότερο, λοιπόν, να προκληθεί διάσπαση κατά τη δοκιμή, οπότε, στη συνέχεια, μπορούμε να εντοπίσουμε και διορθώσουμε τις θέσεις φθοράς, παρά κατά τη λειτουργία του καλωδίου. Κατά τη δοκιμή VLF ένας ηλεκτρικός δενδρίτης, που εμφανίζεται σε ένα σημείο ανομοιογένειας της μόνωσης, ενισχύεται, προκαλώντας τη διάτρηση της μόνωσης. Η έναρξη της δενδροειδούς διάσπασης και ο χρόνος δημιουργίας του αγωγίμου καναλιού είναι συνάρτηση της συχνότητας και του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής. Τα επίπεδα της εφαρμοζόμενης τάσης είναι $2U_0$ έως $3U_0$ (όπου U_0 η ονομαστική φασική τάση του καλωδίου), ενώ ο χρόνος της δοκιμής κυμαίνεται από 15 έως 60 min κατά IEEE [13, 14] και 60min κατά CENELEC [12]. Στις VLF δοκιμές χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενες τάσεις, ημιτονοειδούς ή

συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής, συχνότητας από 0,01Hz έως 1Hz. Η, συνηθέστερα, χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι 0,1Hz.

Όταν σε ένα σημείο ανομοιογένειας η τιμή του πεδίου ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε έναρξη μερικών εκκενώσεων. Η συγκεκριμένη τιμή του πεδίου είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, της γεωμετρίας των θέσεων ανομοιογένειας και του χωρικού φορτίου. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, τα αγωγιμα κανάλια, που δημιουργούνται, οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, το 68% των σφαλμάτων συμβαίνουν εντός 12min, το 89% αυτών εντός 30min, το 95% εντός 45min και το 100% των σφαλμάτων εντός 60min, από την επιβολή της τάσης [14].

Εάν το καλώδιο αποτύχει στη δοκιμή, η τάση δοκιμής μηδενίζεται και το σύστημα εκφορτίζεται και γειώνεται. Στη συνέχεια, με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, μπορούν να εντοπισθούν οι θέσεις ανομοιογένειας και φθοράς, οι οποίες επιδιορθώνονται, και το καλώδιο δοκιμάζεται εκ νέου, έως ότου περάσει με επιτυχία τη δοκιμή. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων (>95%), που έχουμε καταγράψει ως Εργαστήριο, οφείλεται σε κακή κατασκευή συνδέσμου ή ακροκιβωτίου. Επίσης, παρατηρείται ότι, ο αριθμός σφαλμάτων σε εταιρείες εγκατάστασης καλωδίων, που ελέγχονται την τελευταία δεκαετία, μειώνεται, με την πάροδο του χρόνου. Αυτό πρέπει να οφείλεται, αφ' ενός μεν, στη βελτίωση των υλικών (συνδέσμων, ακροκιβωτίων), αφ' ετέρου, δε, στον τρόπο εγκατάστασης, συναρτώμενο και με την, εν τω μεταξύ, αποκτηθείσα εμπειρία από πλευράς των συνεργείων εγκατάστασης καλωδίων. Ο αριθμός σφαλμάτων σε έργα «νέων» ή πρωτοελεγχόμενων συνεργείων είναι αυξημένος, σε σχέση με τον αριθμό σφαλμάτων συνεργείων, που ελέγχονται περισσότερα χρόνια.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, συσκευές ή άλλες εγκαταστάσεις των 50Hz ή 60Hz, ονομάζονται πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (Extremely Low Frequency) και αποτελούν μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες, οι οποίες, είναι, μεν, προφανώς, ανίκανες να προκαλέσουν άμεσα ιονισμό, αλλά ικανές, ενδεχομένως, να προκαλέσουν ηλεκτρικές, θερμικές ή χημικές επιδράσεις στα κύτταρα, ευεργετικές ή επιβλαβείς, για τη λειτουργία τους [16, 17].

Η δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται στις επικρατούσες στους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης τάσεις, ανεξάρτητα από το εάν οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται ή όχι από ρεύμα. Τα ηλεκτρικά πεδία παραμορφώνονται από την παρουσία αγωγιμων διατάξεων ή ανθρώπινου σώματος, ενώ θωρακίζονται από οικοδομικά υλικά, δένδρα, φράκτες, κ.λπ.. Το μέγεθος που εκφράζει πόσο ισχυρό είναι το ηλεκτρικό πεδίο είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E και εξαρτάται από την τάση, τη γεωμετρία και την απόσταση.

Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου οφείλεται στις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης. Τα μαγνητικά πεδία, σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά, διαπερνούν τα οικοδομικά υλικά και το ανθρώπινο σώμα, καθιστώντας τη θωράκιση δύσκολη. Το μέγεθος που εκφράζει πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο είναι η μαγνητική επαγωγή B και εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος, τη γεωμετρία και την απόσταση.

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία αποσβέννυνται, όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, που τα δημιουργεί και, κατά συνέπεια, οπτική επαφή με πάσης φύσεως ηλεκτρικές εγκαταστάσεις δεν συνεπάγεται απαραίτητα και έκθεση σε πεδία. Η απόσβεση αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη, είτε της απόστασης, είτε δύναμης της απόστασης, ανάλογα με το σημείο παρατήρησης (ταχύτερες μειώσεις πλησίον της πηγής και πιο αργές μειώσεις μακριά της).

Τα πεδία εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Μικρές εντάσεις ρεύματος, σε συνδυασμό με μικρές αποστάσεις, όπως είναι οι αποστάσεις μεταξύ ηλεκτρικών συσκευών και ανθρώπων στα σπίτια, προκαλούν μαγνητικά πεδία, τα οποία είναι πολλές φορές μεγαλύτερα από εκείνα, που οφείλονται στις εναέριες γραμμές, όπου υπάρχουν μεγάλες εντάσεις, αλλά και μεγάλες αποστάσεις. Επομένως, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι υποσταθμοί υψηλής τάσεως, εγκαταστάσεις, δηλαδή, οι οποίες προκαλούν, συχνά, ανησυχίες λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους, δεν προκαλούν, πάντα, τις μεγαλύτερες πεδιακές εντάσεις, σε σχέση με τις πεδιακές εντάσεις άλλων πηγών (π.χ. ηλεκτρικών οικιακών συσκευών).

Πολλοί είναι αυτοί που συσχετίζουν την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία με βλαβερές συνέπειες στον ανθρώπινο οργανισμό (λευχαιμία, μεταλλάξεις, καρκινογένεσις, κ.α.). Για το σκοπό αυτό, έχουν πραγματοποιηθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη πολλές επιδημιολογικές, κλινικές και εργαστηριακές μελέτες, προκειμένου να διερευνηθούν οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, από την έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι, επίσης, δυνατόν να προκαλέσουν

παρεμβολές σε βηματοδότες (ή άλλα εμφυτεύματα σε ανθρώπινο οργανισμό) και να επηρεάσουν την ποιότητα της εικόνας σε οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία, για τις εκπομπές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων έχει εκδοθεί η Κοινή Υπουργική Απόφαση με αριθμό 3060 (ΦΟΡ) 238 (Φ.Ε.Κ. Αρ. 512, Τεύχος Δεύτερο, 25 Απριλίου 2002) [18] από τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και Υγείας και Πρόνοιας, με θέμα: «τα μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων». Η προαναφερθείσα Κ.Υ.Α. βασίστηκε στη Σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης "Σχετικά με τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία 0 Hz - 300 GHz" (L199, 1999/519/EC) και στις κατευθυντήριες γραμμές (guidelines) που εξέδότησαν από την ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) το 1998 [19]. Οι βασικοί περιορισμοί προέκυψαν από τις τιμές κατωφλίου που προκαλούν δυσμενείς βιολογικές επιδράσεις και έχουν οριστεί λαμβάνοντας υπ' όψη μεγάλους συντελεστές ασφαλείας. Τα επίπεδα αναφοράς, που σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία αποτελούν τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων, αφορούν στα μετρούμενα μεγέθη του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου για συχνότητες έως 150 kHz και έχουν ίδιες τιμές με την Σύσταση της Ε.Ε. (Πίνακας 1).

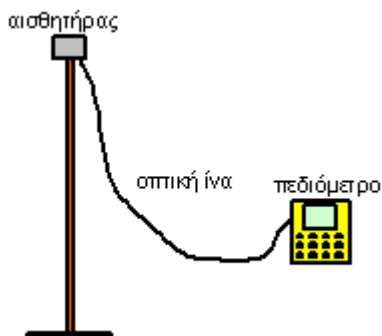
Από τον Πίνακα 1 προκύπτει ότι, για τη συχνότητα των 50 Hz, τα όρια για το γενικό πληθυσμό είναι 5 kV/m, για το ηλεκτρικό πεδίο και 100 μ T, για το μαγνητικό. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητη η μέτρηση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, σε κρίσιμες περιοχές ή εγκαταστάσεις (κατοικημένες περιοχές, σχολεία, δημόσιες υπηρεσίες, αθλητικούς χώρους), προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον πληρούνται οι απαιτήσεις για την ασφαλή έκθεση σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Πίνακας 1 Επίπεδα αναφοράς της Ελληνικής Νομοθεσίας για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων [18]

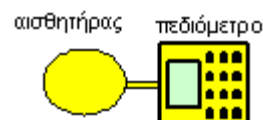
Ζώνη συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Μαγνητική Επαγωγή (μ T)
0-1 Hz	-	4×10^4
1-8 Hz	10000	$4 \times 10^4 / f^2$
8-25 Hz	10000	$5000 / f$
0,025-0,8 kHz	$250 / f$	$5 / f$
0,8-3 kHz	$250 / f$	6.25
3-150 kHz	87	6.25

Σημείωση: στους τύπους μπαίνει το f στις αντίστοιχες μονάδες (Hz ή kHz, κατά περίπτωση)

Η μέτρηση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας είναι μία μέτρηση που, σπανίως, πραγματοποιείται στα αιολικά πάρκα [20]. Γίνεται, συνήθως, κοντά σε υποσταθμούς 150/20kV και γραμμές μεταφοράς, που βρίσκονται/περνούν σε/από κατοικημένες περιοχές. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τα ισχύοντα διεθνή Πρότυπα [21, 22]. Ο εξοπλισμός μέτρησης πρέπει να διαθέτει πιστοποιητικά διακρίβωσης εν ισχύ, γιατί απαιτείται η επεξεργασία των μετρήσεων μέσω κατάλληλου συντελεστή διόρθωσης. Η ύπαρξη υπόγειων καλωδίων (που διαθέτουν μεταλλική θωράκιση) μηδενίζει το ηλεκτρικό πεδίο και μειώνει το μαγνητικό (μέσω κατάλληλης διάταξης των αγωγών). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, που έχουμε πραγματοποιήσει, τόσο πλησίον εναερίων δικτύων, όσο και πλησίον καλωδίων, είναι κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια [20]. Προβλήματα έχουν υπάρξει, μόνο, σε περιπτώσεις αυθαιρέτων κατασκευών, που έχουν γίνει μεταγενέστερα κάτω ή πλησίον της εναέριας γραμμής.



α) Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου



β) Μέτρηση μαγνητικού πεδίου

Σχήμα 10: Πειραματική διάταξη μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [23]

Οι μετρήσεις του πεδίου πρέπει να γίνονται μόνο από διαπιστευμένα εργαστήρια, γιατί τα λάθη (ακατάλληλα όργανα ή/και μέθοδοι) [23] οδηγούν σε εντελώς αδικαιολόγητο πανικό τους κατοίκους και εχθρικότητα έναντι των επενδύσεων.

Συνηθισμένα σφάλματα κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας στα αιολικά πάρκα είναι:

- α) η μη ύπαρξη κατάλληλης απόστασης ανάμεσα στον αισθητήρα του ηλεκτρικού πεδίου και το χειριστή του πεδιομέτρου ($>3m$). Στο Σχήμα 10 παρατηρείται η ύπαρξη οπτικής ίνας στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου ενώ δεν είναι απαραίτητη στην μέτρηση του μαγνητικού πεδίου.
- β) η διακύμανση του ρεύματος της γραμμής, η οποία οδηγεί σε ανάλογη διακύμανση του μαγνητικού πεδίου.
- γ) η ανιστροπία του πεδίου.
- δ) η μη ύπαρξη κατάλληλης ηλεκτρικής θωράκισης του αισθητήρα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα επειδή το ηλεκτρικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο μπορεί να δημιουργήσει επαγόμενα ρεύματα στο όργανο μέτρησης του μαγνητικού πεδίου διαταράσσοντας έτσι τη λειτουργία του.
- ε) αντικείμενα που περιέχουν μη μόνιμους μαγνήτες ή μη μαγνητικούς αγωγούς επηρεάζουν την τιμή του μαγνητικού πεδίου και θα πρέπει η απόστασή τους από το πεδιομέτρο να είναι τουλάχιστον τριπλάσια της μέγιστης διάστασής τους.
- στ) η μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου
 - κοντά σε άλλες γραμμές ισχύος. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ανάλογο της τάσης.
 - κοντά σε πυλώνες ή άλλα γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα (π.χ. Φράχτες, κ.λπ), οδηγεί σε μέτρηση χαμηλότερων τιμών από τις πραγματικές.
 - όταν υπάρχει ψηλό χορτάρι, υγρό έδαφος, κ.λπ..

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αυξανόμενος αριθμός αιολικών πάρκων έχει οδηγήσει στην ανάγκη διενέργειας, από ανεξάρτητο φορέα, δοκιμών και μετρήσεων για την παραλαβή των έργων. Οι δοκιμές και μετρήσεις χωρίζονται

α) σε αυτές που γίνονται στο στάδιο της κατασκευής του έργου:

- Μέτρηση ειδικής αντίστασης του εδάφους,
- Μέτρηση αντίσταση γείωσης,
- Δοκιμή αντοχής μανδύα καλωδίων μέσης τάσης (με dc τάση), αρχικός έλεγχος.

β) σε αυτές που γίνονται μετά την ολοκλήρωση του έργου, στο στάδιο της παραλαβής:

- Δοκιμή αντοχής μανδύα καλωδίων μέσης τάσης (με dc τάση), τελικός έλεγχος
- Δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής καλωδίων μέσης τάσης (με VLF τάση),
- Μέτρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων.

Μετά την οριστική χωροθέτηση των πλατειών ανέγερσης του πάρκου, ξεκινά η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Πρέπει να αποφασισθεί σωστά το πλήθος των αξόνων ανά θέση, καθώς και ο αριθμός των μετρήσεων και οι αποστάσεις μέτρησης ώστε να μπορεί να προκύψει η αντιπροσωπευτική δομή του εδάφους, που είναι απαραίτητη για τη μελέτη των συστημάτων γείωσης.

Η μέτρηση της αντίστασης των συστημάτων γείωσης πρέπει να γίνεται πριν την οριστική διασύνδεση των συστημάτων (προς τούτο, δε, είναι απαραίτητη η ύπαρξη φρεατίων σύνδεσης - αποσύνδεσης) και χωρίς να είναι συνδεδεμένα τα καλώδια.

Ειδικά για την περίπτωση της αντίστασης γείωσης, ελέγχεται ο προβληματισμός, κατά πόσον το ζητούμενο πρέπει να είναι η τιμή της αντίστασης γείωσης (25Ω ή 10Ω ή 1Ω) ή οι τιμές των αναπτυσσομένων τάσεων επαφής και βηματικών. 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 του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου είναι η μη ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Η δοκιμή του μανδύα των καλωδίων θα πρέπει να ξεκινά κατά την εγκατάσταση των καλωδίων και να επαληθεύονται εκ νέου τα αποτελέσματα, μαζί με δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής (VLF), πριν την οριστική διασύνδεση του πάρκου με τη ΔΕΗ.

Η μέτρηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων είναι προαιρετική μέτρηση, που γίνεται μετά την έναρξη λειτουργίας του έργου (συνήθως όταν υπάρχει υποσταθμός υψηλής τάσης), ώστε να καθυστερηθούν οι κάτοικοι της περιοχής ότι, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι πολύ χαμηλότερα από τα επιτρεπόμενα όρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΛΟΤ EN ISO 17025: "Γενικές απαιτήσεις για την ικανότητα των εργαστηρίων δοκιμών και διακριβώσεων", 3 Ιουνίου 2005.
- [2] ΕΛΟΤ EN ISO 9001: "Συστήματα διαχείρισης της ποιότητας - Απαιτήσεις", 19 Δεκεμβρίου 2008.
- [3] IEEE Std 81: "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.
- [4] IEEE Std 81.2: "IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems", June 1992.
- [5] ANSI/IEEE Std 80: "IEEE guide for safety in AC substation grounding", 30 January 2000.
- [6] 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, Ενότητα Δ: Ηλεκτρικές Μονώσεις και Γειώσεις; Δ5, σελ. 201-208.
- [7] ΕΛΟΤ HD 637 S1: "Εγκαταστάσεις ισχύος με ονομαστική τάση πάνω από 1 kV εναλλασσομένου ρεύματος", 20 Απριλίου 2000.
- [8] ΕΛΟΤ EN61400-24: "Wind turbine generator systems - Part 24: Lightning protection", 9 Ιουλίου 2010.
- [9] IEC 60502-2: "Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) and up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)", 2005
- [10] IEC 60229: "Tests on anti-corrosion protective coverings of metallic cable sheaths", 1996
- [11] Χριστοδούλου Χ.Α., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Ηλεκτρικές δοκιμές μετά την εγκατάσταση σε καλώδια μέσης τάσης», Συγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, Τεύχος 184, σελ. 24-27, Σεπτέμβριος 2007.
- [12] ΕΛΟΤ HD 620 S2: "Καλώδια διανομής με εξωθημένη μόνωση ονομαστικής τάσης από 3,6/6 (7,2) kV μέχρι και 20,8/36 (42) kV", 15 Ιανουαρίου 2010.
- [13] IEEE Std 400: "IEEE Guide for field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems", 2001.
- [14] IEEE Std 400.2: "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)", 2004.
- [15] Gockenbach E., Hauschild W.: "The Selection of the Frequency Range for High-Voltage On-Site Testing of Extruded Insulation Cable Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2000, Vol.16, No.6, pp. 11-16.
- [16] Filippopoulos, G., Karabetsos, E.: "A quick and easy method for checking compliance of multi-frequency magnetic fields with ICNIRP's guidelines", Health Physics, August 2008, Vol.95, No.2, pp. 245-254.
- [17] Τσανάκας Δ., Μίμος Ε., Ζαχαροπούλου Π., Καραμανής Κ.: «Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο των Υ/Σ 150kV εξωτερικού χώρου ως περιβαλλοντικοί παράγοντες». Σύνοδος ΕΕ CIGRE, 27-28 Νοεμβρίου 2003.
- [18] Κοινή Υπουργική Απόφαση, Αριθμός 3060 (ΦΟΡ) 238, ΦΕΚ 512 / Β /25.04.02: «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων».
- [19] ICNIRP Guidelines, International Committee for Non-Ionizing Radiation Protection: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Physics, April 1998, 74 (No 4), 494-522.
- [20] Israel, M., Ivanova, P., Ivanova, M.: "Electromagnetic fields and other physical factors around wind power generators (pilot study)", The Environmentalist, June 2011, Vol.31, No.2, pp. 161-168.
- [21] ΕΛΟΤ IEC 61786: 2003, «Μετρήσεις μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων - Ειδικές προδιαγραφές για τα όργανα και οδηγίες για τις μετρήσεις», 2003.
- [22] ANSI/IEEE Std 644-1994, "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", 01 January 1994
- [23] Χριστοδούλου Χ.Α., Κατσιβέλης Π.Σ., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Συγκριτικές μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων», 3ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Λάρνακα 5-6 Φεβρουαρίου 2010.