

Παράρτημα 1

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ

Π1.1 Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων

Για τη δημιουργία του κρουστικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια EMC 2004 της HILO TEST (1500Joule), με δυνατότητα η τιμή της κορυφής του ρεύματος να κυμαίνεται από 2 ως 25kA. Στη γεννήτρια υπάρχει ενσωματωμένος ωμικός καταμεριστής (50kΩ/50Ω) για τον υποβιβασμό της τάσης, καθώς και αντίσταση μέτρησης του ρεύματος (Current shunt, 1mΩ, 20MHz).



Σχήμα Π1.1: Η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων EMC 2004 της HILO TEST

Η χρησιμοποιούμενη κρουστική γεννήτρια (σχήμα Π1.1), έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [240]:

- 1) Ρεύμα εξόδου: 2 – 25kA±5%
- 2) Κυματομορφή του ρεύματος εξόδου: 8/20μs±20%
- 3) Μέγιστη τιμή τάσης φόρτισης: 0-10kV±2%
- 4) Χρόνος φόρτισης: <20sec
- 5) Μέγιστη αποδιδόμενη ενέργεια: 1500Ws
- 6) Τάση λειτουργίας: 230V, Συχνότητα λειτουργίας: 50/60Hz

- 7) Πλάτος: 460mm, Ύψος: 180mm, Μήκος: 300mm, Βάρος: 65kg
- 8) Αντίσταση απεικόνισης ρεύματος (shunt): 1mΩ, 20MHz
- 9) Εξωτερική είσοδος Trigger: 10V σε 1kΩ
- 10) Ενσωματωμένος ωμικός διαιρέτης τάσης (50kΩ/50Ω)

Η γεννήτρια εξασφαλίζει την απόλυτη ασφάλεια του χειριστή με ράβδο γείωσης, λυχνίες ασφαλείας και άλλα κυκλώματα ασφαλείας. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα αυτόματο κύκλωμα ασφαλείας, το οποίο, αν διακοπεί, απενεργοποιεί τον παλμό της γεννήτριας και εκφορτίζει τον πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας. Επίσης, υπάρχουν μια πράσινη και μία κόκκινη λυχνία, σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας VDE 0104. Όταν είναι αναμμένη η πράσινη λυχνία, σημαίνει ότι δεν υπάρχει υψηλή τάση. Όταν αναβοσβήνει η κόκκινη λυχνία, σημαίνει ότι επίκειται επιβολή υψηλής τάσης, ενώ όταν είναι σταθερά αναμμένη έχουμε επιβολή υψηλής τάσης. Τέλος, η ράβδος γείωσης χρησιμεύει στη γείωση των μεταλλικών μερών της γεννήτριας μετά το πείραμα, έτσι ώστε να εξουδετερωθούν τυχόν παραμένοντα φορτία.

Μια άλλη δυνατότητα της συγκεκριμένης γεννήτριας είναι ότι οι παράμετροι, κατόπιν ρύθμισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την είσοδο trigger ενός παλμογράφου. Αυτό γίνεται με ένα σήμα 10 V στον BNC ακροδέκτη TRIG-IN.

Π1.2 Παλμογράφος

Στα πειράματα, που διεξήχθησαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DL 1540 της εταιρείας YOKOGAWA. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του παλμογράφου συνοψίζονται παρακάτω [241, 242]:

- 1) Κανάλια εισόδου: 4
- 2) Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 200MS/s
- 3) Μέγιστο μήκος αρχείου: 120Kwords (με 2 κανάλια) ή 56Kwords (με 3 ή 4 κανάλια)
- 4) Εύρος ζώνης συχνοτήτων: 150MHz
- 5) Κατακόρυφη ανάλυση: 8bits (κανονικά) ή 9bits (εξομαλυσμένα)
- 6) Επίπεδο τάσης εξωτερικής εισόδου trigger: 1,5V
- 7) Εύρος συχνότητας εξωτερικής εισόδου trigger: από DC ως 15MHz

- 8) Ταχύτητα ανανέωσης οθόνης: μέγιστο 60screens/s
- 9) Ευαισθησία: από 1mV/div έως 5V/div
- 10) Ακρίβεια: DC 100mV/div
- 11) Απόκλιση: 1,5% από 8div + LSB
- 12) Ακρίβεια εκτύπωσης τάσης: από 1mV έως 50mV/div
- 13) Απόκλιση: 2,5% της καθορισμένης τιμής + 0,2mV
- 14) Μέγιστη τάση εισόδου: 250V (είτε DC είτε AC) με μέγιστο 1kHz
- 15) Εμπέδηση εισόδου: 1MΩ (με απόκλιση 1,5%), περίπου 25pF
- 16) Απομόνωση καναλιού: -40dB



Σχήμα Π1.2: Ψηφιακός παλμογράφος DL 1540 της εταιρείας YOKOGAWA

Π1.3 Αγωγιμόμετρο

Η αγωγιμότητα του νερού της δεξαμενής μετρήθηκε με το αγωγιμόμετρο HI 8733 της εταιρείας HANNA Instruments, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα Π1.3. Η ακρίβεια του οργάνου στους 20⁰C είναι $\pm 1\%$ σε πλήρη κλίμακα. Η ανάλυση (resolution) των μετρήσεων ήταν 0,01mS/cm, όπως αναφέρεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου, τα οποία συνοπτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [243]:

Εύρος κλίμακας	0,0-199,9 μ S/cm	0-1999 μ S/cm	0,00-19,99mS/cm	0,0-199,9mS/cm
Ανάλυση	0,1 μ S/cm	1 μ S/cm	0,01 mS/cm	0,1 mS/cm

Πίνακας Π1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγιμομέτρου

Η διαδικασία επαλήθευσης που ακολουθείται είναι η ακόλουθη. Μετρείται η θερμοκρασία περιβάλλοντος Τοποθετείται η κεφαλή του οργάνου στο υγρό διάλυμα (HI7030, HI7031, HI7033) και ρυθμίζεται η ένδειξη του οργάνου σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα Π1.2 [243].

	HI7030	HI7031	HI7033
Θερμοκρασία (°C)	Αγωγιμότητα (μ S/cm)	Αγωγιμότητα (μ S/cm)	Αγωγιμότητα (μ S/cm)
0	7150	776	64
5	8220	896	65
10	9330	1020	67
15	10480	1147	68
16	10720	1173	70
17	10950	1199	71
18	11190	1225	73
19	11430	1251	74
20	11670	1278	76
21	11910	1305	78
22	12150	1332	79
23	12390	1359	81
24	12640	1386	82
25	12880	1413	84
26	13130	1440	86
27	13370	1467	87
28	13620	1494	89
29	13870	1521	90
30	14120	1548	92
31	14370	1575	94

Πίνακας Π1.2: Αγωγιμότητες πρότυπων διαλυμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Π1.4 Υπό κλίμακα προσομοίωση

Η χρήση δεξαμενής πλήρους ηλεκτρολύτου (electrolytic tank) είναι μία ευρέως γνωστή, πρακτική μέθοδος για την μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [175, 194-197].

Η αρχή χρήσης της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής στη βιβλιογραφία [194] είναι συνήθως διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Συνήθως, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης. Το ρεύμα μεταξύ ηλεκτροδίων μέσα σε μια ηλεκτρολυτική δεξαμενή χρησιμοποιείται ως ηλεκτρικό ανάλογο στη μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου, σε διηλεκτρικά μέσα στην υψηλή τάση. Η δεξαμενή χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των ισοδυναμικών γραμμών, από την κλίση των οποίων καθορίζεται η ηλεκτρική ένταση σε οποιοδήποτε σημείο (αφού $\mathbf{E} = -\text{grad } V$).

Η αναλογία στηρίζεται στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες όταν εφαρμοστούν σε ισοτροπικό διηλεκτρικό μέσο χωρίς φορτίο και περιορισμένο από δύο εγκάρσια, υπό τάση, ηλεκτρόδια, ορίζονται διανυσματικά ως ακολούθως [206-208]:

$$\text{div } \mathbf{D} = 0 \quad (\text{Π1.1})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Π1.2})$$

$$\text{curl } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Π1.3})$$

$$\text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Π1.4})$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, το \mathbf{D} είναι το διάνυσμα της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής σε κάθε σημείο. Στην πράξη έχουμε:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (\text{Π1.5})$$

όπου \mathbf{E} είναι το διάνυσμα της ηλεκτρικής δύναμης και ε η επιτρεπτικότητα του διηλεκτρικού μέσου.

Η εξίσωση (Π1.5) με αντικατάσταση στην εξίσωση (Π1.1) γίνεται :

$$\text{div } (\varepsilon \cdot \mathbf{E}) = 0 \quad (\text{Π1.6})$$

Σε ένα αγώγιμο διηλεκτρικό μέσο, ο νόμος του Ohm μπορεί να εκφραστεί ως

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (\text{Π1.7})$$

όπου \mathbf{J} είναι η πυκνότητα ρεύματος σε κάθε σημείο, \mathbf{E} είναι η ηλεκτρική ένταση που παράγει το ρεύμα και σ είναι η αγωγιμότητα του μέσου.

Η εφαρμογή της αρχής διατήρησης του ρεύματος δίνει για σταθερά ρεύματα εντός του διηλεκτρικού μέσου:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (\text{Π1.8})$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (Π1.7) στην εξίσωση (Π1.8) παίρνουμε:

$$\operatorname{div}(\sigma \cdot \mathbf{E}) = 0 \quad (\text{Π1.9})$$

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (Π1.6) και (Π1.9) προκύπτει η εξίσωση $\operatorname{div}(\rho \cdot \mathbf{E}) = 0$, με την επιτρεπτότητα ε (Π1.6) να αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα σ (Π1.9).

Αφού $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \mathbf{V}$, καθεμία εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\operatorname{div}(-\operatorname{grad} \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{Π1.10})$$

η οποία ισοδυναμεί με την εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2 \mathbf{V} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Π1.11})$$

Οι εξισώσεις (Π1.5-Π1.9) δείχνουν ότι η μορφή της ηλεκτρικής ροής, ανάμεσα σε διαχωρισμένα ηλεκτρόδια από μονωτικό μέσο επιτρεπτότητας ε , ισοδυναμεί με τη μορφή του ρεύματος ανάμεσα στα ίδια ηλεκτρόδια διαχωρισμένα από μέσο αγωγιμότητας σ . Αφού οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι όλες ορθογώνιες, με τους την ηλεκτρικής ροής μέσα σε ένα μονωτικό μέσο και με τους ροή του ρεύματος συμπεριφερόμενα ως ένα, οι θέσεις των ισοδυναμικών επιφανειών των δύο μέσων ταυτίζονται. Σε κάθε μέσο η κατανομή του δυναμικού μπορεί να είναι λύση της εξίσωσης (Π1.11), $\mathbf{V} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ σε οποιοδήποτε σημείο των μέσων. Οι εξισώσεις (Π1.6), (Π1.9) και (Π1.11) δεν επηρεάζονται από την κλίμακα της αναλογίας.

Μία μαθηματική λύση είναι δυνατή μόνο σε προβλήματα που έχουν απλή γεωμετρία. Αντίθετα, σε πιο πολύπλοκες διατάξεις αντιστοιχεί, στην πράξη, μία

λύση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού της κατανομής του δυναμικού με τη βοήθεια ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Αυτό σημαίνει ότι η δεξαμενή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της κατανομής της ηλεκτρικής έντασης στις διατάξεις υψηλής τάσης μέσω του σχεδιασμού πεδίου της αυτής αναλογίας [206-208].