ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ 1954

ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΤΟΜΟΣ ΠΡΩΤΟΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ Γ. ΒΛΑΧΟΥ

β΄ έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: Αρχές Ηλεκτρομαγνητισμού

1.1 Εισαγωγή. 1
1.2 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Νόμος του Faraday. 7
1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος. 9
1.4 Μαγνητικά κυκλώματα. 16
Ερωτήσεις. 21
Προτεινόμενες ασκήσεις. 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: Μετασχηματιστές

2.1 Εισαγωγή. 25
2.2 Δομή και χρήσεις των μονοφασικών Μ/Σ. 25
2.3 Λειτουργία των μονοφασικών Μ/Σ. 26
2.4 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ. 36
2.5 Διακύμανση τάσης ή εκατοστιαία πτώση τάσης. 38
2.6 Απώλειες και απόδοση των πραγματικών Μ/Σ – Γενικά. 39
2.7 Τριφασικός Μ/Σ. 50
2.8 Συνθήκες παραλληλισμού μονοφασικών Μ/Σ. 61
2.9 Συνθήκες παραλληλισμού. 64
2.10 Ειδικές κατηγορίες Μ/Σ. 64
2.11 Συντήρηση, βλάβες και επισκευές Μ/Σ. 67
Ερωτήσεις. 71
Προτεινόμενες ασκήσεις. 71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: Ανορθωτές ισχύος

3.1 Εισαγωγή. 73
3.2 Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος. 73
3.3 Το πρόβλημα ψύξης και προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος. 77
3.4 Σύγκριση των ηλεκτρονικών ισχύος. 79
3.5 Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων ισχύος – Εισαγωγή. 79
Ερωτήσεις. 82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: Ηλεκτρομηχανική Μετατροπή Ενέργειας

4.1 Εισαγωγή. 83
4.2 Στοιχειώδης κινητήρας μαγνητικής αντίστασης – Γενικά. 84
4.3 Μαγνητικό σύστημα με διπλή διέγερση. 89
Ερωτήσεις. 93

Προτεινόμενες ασκήσεις. 94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

5.1 Εισαγωγή 95
5.2 Δομή των μηχανών ΣΡ. 95
5.3 Τυλίγματα μηχανών ΣΡ. 97
5.4 Λειτουργία γεννήτριας ΣΡ. 100
5.5 Είδη μηχανών (γεννητριών) ΣΡ – Εισαγωγή. 107
5.6 Προτεινόμενες ασκήσεις. 124
5.7 Κινητήρες ΣΡ – Εισαγωγή. 125
5.8 Είδη κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή. 127
5.9 Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή. 133
5.10 Κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες. 139
5.11 Βλάβες, αιτίες και επισκευές των μηχανών ΣΡ 140
Ερωτήσεις – Εργασίες 150
Προτεινόμενες ασκήσεις 151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: Σύγχρονες Γεννήτριες

6.1 Εισαγωγή 153
6.2 Κατηγορίες σύγχρονων γεννητριών. 153
6.3 Συστήματα διέγερσης σύγχρονων γεννητριών. 153
6.4 Αρχή λειτουργίας της στοιχειώδους σύγχρονης γεννήτριας 155
6.5 Επαγωγικό τύμπανο σύγχρονης γεννήτριας. 157
6.6 Ανάπτυξη τάσης σε μια σύγχρονη γεννήτρια. 160
6.7 Αντίδραση τυμπάνου σύγχρονης γεννήτριας 165
6.8 Ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας. 166
6.9 Ισοζύγιο ισχύων και απόδοση της σύγχρονης γεννήτριας 166
6.10 Εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή σε σύγχρονη γεννήτρια 167
6.11 Ρύθμιση της πραγματικής και αέργου ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας 168
6.12 Πειραματικός προσδιορισμός των κυκλωματικών στοιχείων του απλοποιημένου ισοδυνάμου, ανά φάση, ηλεκτρικού κυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας. 169
6.13 Ρύθμιση και έλεγχος τάσης στις σύγχρονες γεννήτριες. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης. 171
6.14 Ψύξη, βλάβες, λίπανση και συντήρηση των σύγχρονων γεννητριών. 172
Ερωτήσεις 180
Προτεινόμενες ασκήσεις 181
Πίνακας συμβόλων 183
Ευρετήριο 184

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να κατανοηθούν οι αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου είναι απαραίτητο να δοθούν οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού.

Οι έννοιες του μαγνητικού πεδίου, της μαγνητικής ροής, της μαγνητικής διέγερσης και των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην κατασκευή και λειτουργία, γενικά, των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών.

1.1.1 Μαγνητικό πεδίο

Για το μαγνητικό πεδίο ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί.

Ορισμός 1: Μαγνητικό πεδίο είναι η περιοχή του χώρου, σε κάθε σημείο της οποίας ένα φυσικό διανυσματικό μέγεθος, που ονομάζεται ***μαγνητική επαγωγή***, λαμβάνει μία ορισμένη τιμή.

Ορισμός 2: Μαγνητικό πεδίο είναι η περιοχή του χώρου μέσα στην οποία αν τοποθετηθεί ρευματοφόρος αγωγός, μαγνήτης ή κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δέχεται την επίδραση δυνάμεων.

1) Μαγνητική επαγωγή

Έστω κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο q, με ταχύτητα $\vec{v}$ μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο (σχ. 1.1). Στο φορτίο ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μία δύναμη Laplace, $\vec{F}_L$.

Σχ. 1.1
Δύναμη Laplace σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο

Πειραματικά, αποδεικνύεται ότι η δύναμη Laplace ($\vec{F}_L$), η οποία ασκείται σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο q, μέσα σε μαγνητικό πεδίο, με ταχύτητα $\vec{v}$ είναι:

1) Ανάλογη της ταχύτητας $\vec{v}$.
2) Ανάλογη του φορτίου q.
3) Ανάλογη του ημιτόνου της γωνίας φ, η οποία σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου.

Το μέτρο της δύναμης Laplace, δίδεται:

$$F_L = Bqv\eta\mu\varphi. \qquad (1.1)$$

Η σταθερή αναλογίας, B, από την τιμή της οποίας εξαρτάται το μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ***μαγνητική επαγωγή*** ή ***πυκνότητα μαγνητικής ροής***. Διανυσματικά, η ***δύναμη Laplace*** γράφεται:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \qquad (1.2)$$

Η διεύθυνση της δύναμης Laplace είναι κάθετη στο επίπεδο, που ορίζουν τα διανύσματα $\vec{v}$ και $\vec{B}$ και η φορά της είναι η ίδια με εκείνη, κατά την οποία προχωρεί δεξιόστροφος κοχλίας, αν στρέψουμε το διάνυσμα $\vec{v}$ κατά την μικρότερη γωνία για να συναντήσουμε το διάνυσμα $\vec{B}$ (στο σχ. 1.1 κατά τη γωνία φ).

Από τη σχέση 1.1, έχουμε:

$$B = \frac{F_L}{qv\eta\mu\varphi}. \qquad (1.3)$$

Η σχέση 1.3, δίδει το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής B. Ένα μαγνητικό πεδίο έχει μαγνητική επαγωγή 1 Tesla (1 T) σ' ένα σημείο του, όταν φορτίο 1 C [q = 1 C (Coulomb)] το οποίο περνάει από το σημείο με ταχύτητα 1 m/s, κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής $\vec{B}$, δέχεται δύναμη 1 N: $1T = \frac{1Ns}{1Cm} = \frac{1N}{Am}$

όπου: $\frac{1C}{1s} = 1A$ (Αμπέρ).

Υπολογίζουμε το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής (B) στο εσωτερικό του σωληνοειδούς επιλέγοντας την κλειστή γραμμή abcd, στην οποία εφαρμόζουμε τον Νόμο του Ampere:

$$\int B\cdot ds=\int_a^b B\cdot ds+\int_b^c B\cdot ds+\int_c^d B\cdot ds+\int_d^a B\cdot ds. \quad (1.16)$$

Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς η μαγνητική επαγωγή $\vec{B}$ είναι παράλληλη στη στοιχειώδη μετατόπιση ds, κατά μήκος της κλειστής διαδρομής abcd, οπότε ισχύει: $B\cdot ds = Bds$.

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, στο τμήμα ab, είναι σταθερό και ισούται με: $\int_a^b B\cdot ds = B$.

Είναι: $\int_b^c B\cdot ds = 0$ και $\int_d^a B\cdot ds = 0$

γιατί το ds είναι κάθετο στο διάνυσμα $\vec{B}$.

Είναι: $\int_c^d B\cdot dA = 0$

γιατί θεωρούμε μηδέν την μαγνητική επαγωγή $\vec{B}$, η οποία είναι εκτός σωληνοειδούς.

Ο αριθμός των ρευμάτων, που εμπλέκονται με την κλειστή γραμμή abcd είναι ίσος με τον αριθμό των σπειρών n_ℓ ($n_\ell = n\ell$), οι οποίες περιλαμβάνονται στο τμήμα ab μήκους ℓ.

Αυτά τα ρεύματα είναι ίσα και έχουν την ίδια φορά. Από τη σχέση 1.16, προκύπτει ότι:

$$\int B\cdot ds=\int_a^b Bds = B \quad \text{και } B\ell = \mu_o n_\ell I = \mu_o n\ell I.$$

Τελικά η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι:

$$B = \mu_o In \quad (1.17)$$

Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι ομοιόμορφο και το μέτρο του εξαρτάται μόνο από το ρεύμα, το οποίο κυκλοφορεί στο σωληνοειδές και από τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους.

4) Μαγνητικό πεδίο δακτυλιοειδούς πηνίου (τορροειδές)

Θεωρούμε ένα δακτυλιοειδές (τορροειδές) πηνίο, το οποίο αποτελείται από n σπείρες (σχ. 1.11).

Τα a και b συμβολίζουν την εσωτερική και την εξωτερική ακτίνα του δακτυλιοειδούς πηνίου, αντίστοιχα, ενώ το r είναι μέση ακτίνα του. Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης I.

Δεδομένης της συμμετρίας του πηνίου, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, το οποίο αναπτύσσεται στο τορροειδές, είναι περιφέρειες κύκλου με κέντρο στον άξονά του.

Εφαρμόζοντας τον Νόμο του Ampere στο πηνίο, επιλέγοντας ως δρόμο ολοκλήρωσης την κλειστή μαγνητική γραμμή ℓ ακτίνας r και φορά η οποία συμπίπτει με εκείνη της μαγνητικής επαγωγής $\vec{B}$ έτσι ώστε τα διανύσματα $\vec{B}$ και ds να είναι παράλληλα και ομόρροπα, έχουμε:

$$\int B\cdot ds = \mu_o nI = 2\pi rB. \quad (1.18)$$

Από τη σχέση 1.18, έχουμε:

$$B = \frac{\mu_o nI}{2\pi r}. \quad (1.19)$$

Αν στη θέση του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής $\vec{B}$, τοποθετήσουμε το διάνυσμα της μαγνητικής διέγερσης H, η σχέση 1.18, τροποποιείται ως εξής: $\int H\cdot ds = nI$ ή $2\pi rH = nI$

και $$H = \frac{nI}{2\pi r} \quad (1.20)$$

όπου n ο συνολικός αριθμός σπειρών του τορροειδούς.

Σχ. 1.11
Δακτυλιοειδές πηνίο

Σχ. 1.31

Να υπολογίσετε τη μαγνητική αντίσταση και τη μαγνητική ροή, όταν το πηνίο αποτελείται από 250 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα 1,5 A.

Λύση

Το μήκος της μέσης μαγνητικής διαδρομής είναι:

$$\ell = 17 + 15 + 17 + 15 = 64\,\text{cm} = 0{,}64\,\text{m}. \qquad (1)$$

Το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα είναι:

$$A = (5\,\text{cm})\cdot(4\,\text{cm}) = (0{,}05\,\text{m})\cdot(0{,}04\,\text{m}) = \\ = 0{,}002^2\,\text{m} = 2\,\text{mm}^2. \qquad (2)$$

Η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι:

$$R_m = \frac{}{\mu A} = \frac{0{,}64}{1.450\cdot(4\pi\times10^{-7})\cdot(2\times10^{-3})} = \\ = 2{,}92\times10^5\,\frac{\text{At}}{\text{Wb}}. \qquad (3)$$

Η μαγνητική ροή είναι:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{nI}{R_m} = \frac{250\cdot1{,}5}{2{,}92\times10^5} = 1{,}28\,\text{mWb}. \qquad (4)$$

Άσκηση 3

Δίδεται το μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος 1.32.

Σχ. 1.32

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των τμημάτων βγλκ, βκ, και κδαβ είναι: $\mu_{r2} = 4972$, $\mu_{r1} = 4821$, $\mu_r = 2426$. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος I, έτσι ώστε να εγκατασταθεί μία μαγνητική ροή $1\cdot45\times10^{-4}$ Wb.

Είναι: $\ell_{\beta\gamma\kappa\lambda} = \ell_{\kappa\delta\alpha\beta} = 0{,}3\,\text{m}$
$\ell_{\beta\kappa} = 0{,}07\,\text{cm}.$

Εμβαδόν εγκάρσιας διατομής: $A = 7\times10^{-4}\text{m}^2$.

Λύση

Το ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος είναι αυτό του σχήματος 1.33:

Σχ. 1.33

Για το βρόχο 2, έχουμε:

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A} = \frac{1{,}4\times10^{-4}}{7\times10^{-4}}\,\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 0{,}2\,\text{T}. \qquad (1)$$

Η ΜΕΔ $H_{\beta\gamma\lambda\kappa}$, είναι: $H_{\beta\gamma\lambda\kappa} = \dfrac{B_2}{\mu_{\beta\gamma\lambda\kappa}} = \dfrac{B_2}{\mu_{r2}\mu_o} =$

$$= \frac{0{,}2\,\text{T}}{4.972\cdot4\pi\times10^{-7}\,\text{Hm}^{-1}} = 32\,\frac{\text{At}}{\text{m}} \qquad (2)$$

Εφαρμόζουμε τον Νόμο του Ampere στον βρόχο 2:

$$H_{\beta\kappa}\ell_{\beta\kappa} - H_{\beta\gamma\lambda\kappa}\ell_{\beta\gamma\kappa\lambda} = 0 \qquad (3)$$

ή $$H_{\beta\kappa}\cdot(0{,}07\,\text{m}) - \left(40\,\frac{\text{At}}{\text{m}}\right)\cdot(0{,}3\,\text{m}) = 0$$

και $$H_{\beta\kappa} = 171\,\frac{\text{At}}{\text{m}}.$$

Η μαγνητική επαγωγή στο τμήμα βκ είναι:

$$B_1 = B_{\beta\kappa} = \mu_{\beta\kappa}H_{\beta\kappa} = \mu_{r1}\mu_o H_{\beta\kappa} = \\ = 4.821\cdot4\pi\times10^{-7}\,\frac{\text{H}}{\text{m}}\cdot171\,\frac{\text{At}}{\text{m}} = 1{,}07\,\text{T}. \qquad (4)$$

Η μαγνητική ροή στο τμήμα βκ είναι:

$$\Phi_1 = B_1A = (1{,}07\,\text{T})\cdot(7\times10^{-4}\,\text{m}^2) = \\ = 7{,}49\times10^{-4}\text{m}^2\,\text{Wb}. \qquad (5)$$

Όταν ο Μ/Σ τροφοδοτείται με μία τάση εναλλασσόμενη ημιτονοειδή $υ_1(t)$, τότε $e_1(t)$ και φ(t) είναι εναλλασσόμενα ημιτονοειδή μεγέθη.

Αν αμελήσουμε τις απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης (απώλειες του σιδηροπυρήνα κατά τη διαδικασία μαγνήτισής του), τότε το ρεύμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μαγνήτιση του πυρήνα του Μ/Σ είναι το ρεύμα μαγνήτισης $i_m(t)$.

Ο πυρήνας του Μ/Σ είναι μη γραμμικός, οπότε το ρεύμα μαγνήτισης δεν είναι εναλλασσόμενο ημιτονοειδές μέγεθος, αλλά είναι παραμορφωμένο.

Μπορεί να αποδειχτεί, όταν αμελούνται οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης (σχ. 2.7), ότι το $i_m(t)$:

1) Περιλαμβάνει αρμονικές συνιστώσες, περιττής τάξης (3^n, 5^n κ.λπ.) και ότι,

2) η σημαντικότερη είναι η 3^n αρμονική (σε φάση 180° με τη θεμελιώδη) (σχ. 2.8).

Δεδομένου ότι το ρεύμα μαγνήτισης είναι μικρό σε σύγκριση με άλλα ρεύματα, σε πρώτη προσέγγιση, θεωρείται ημιτονοειδές, με ενεργό τιμή ίση με την αντίστοιχη του παραμορφωμένου ρεύματος.

Όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης, το ρεύμα $i_m(t)$ προσδιορίζεται γραφικά (σχ. 2.9). Σε αυτήν την περίπτωση, στο ρεύμα μαγνήτισης προστίθεται ένα ρεύμα $i_h(t)$, κυκλικής συχνότητας ω, το οποίο προηγείται του ρεύματος $i_m(t)$ κατά 90° (σχ. 2.10).

Το ρεύμα $i_h(t)$ προηγείται κατά 90° της μαγνητικής

Σχ. 2.7

Παραμορφωμένο ρεύμα μαγνήτισης, $i_m(t)$, λόγω των μη γραμμικών ιδιοτήτων του πυρήνα και χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις απώλειες μαγνητικής υστέρησης

Σχ. 2.8

Ανάλυση του ρεύματος μαγνήτισης στη θεμελιώδη, 3^n και 5^n αρμονική συνισιώσα

Σχ. 2.9

Γραφικός προσδιορισμός του ρεύματος διέγερσης $i_m(t)$ όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης

Σχ. 2.10

Το ρεύμα μαγνήτισης $i_m(t)$ και το ρεύμα $i_h(t)$

Πίνακας 2.1
Συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ με τα αντίστοιχα σύμβολά τους

Ομάδα	***Συνδεσμολογία***	***Σύμβολα***		***Συνδέσεις***	
		Πρωτεύον τύλιγμα	***Δευτερεύον τύλιγμα***	***Πρωτεύον τύλιγμα***	***Δευτερεύον τύλιγμα***
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Οι διάφορες ομάδες προσδιορίζουν τις ακόλουθες οικογένειες:

Οικογένεια I: ομάδες 1, 5, 9

Οικογένεια II: ομάδες 2, 6, 10

Οικογένεια III: ομάδες 3, 7, 11

Οικογένεια IV: ομάδες 0, 4, 8

Στον πίνακα 2.1 δίδονται οι συνηθισμένες συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πράξη με τους αντίστοιχους συμβολισμούς τους.

2.7.1 Τριφασικές συνδέσεις

Για τον μετασχηματισμό των μεγεθών τάσεων ρευμάτων τριφασικής πηγής απαιτούνται τρεις κατάλληλα συνδεμένοι μονοφασικοί Μ/Σ ή ένας τριφασικός Μ/Σ.

Η επιλογή του τριφασικού Μ/Σ σημαίνει οικονο-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η ηλεκτρική ενέργεια, που είναι βιομηχανικά αξιοποιήσιμη, δεν είναι διαθέσιμη στη φύση γι' αυτό είναι απαραίτητο να παραχθεί. Η γεννήτρια είναι διάταξη, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το αντίστροφο συμβαίνει στους κινητήρες.

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας υλοποιείται με τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων, μέσω του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο έχει μεγάλη πρακτική αξία για τις περισσότερες συσκευές. Η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο ηλεκτρικό.

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας βασίζεται στην Αρχή της Διατήρησης της Ενέργειας. Η ενέργεια δεν δημιουργείται, δεν καταστρέφεται, αλλά μετασχηματίζεται από τη μία μορφή σε άλλη.

Στο σχήμα 4.1 δίδονται, σχηματικά, ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας, τα οποία μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα.

Η διαδικασία της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας περιλαμβάνει τέσσερεις μορφές ενέργειας.

Σχ. 4.1

Σχηματική παράσταση διατάξεων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας: (α) γεννήτρια και (β) κινητήρας

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι ενεργειακοί μετατροπείς, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

Οι απώλειες ενέργειας εντοπίζονται στο χαλκό (απώλειες Joule), στη διαδικασία μαγνήτισης (απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης), στις τριβές και στον ανεμισμό κ.λπ..

Η εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας με τη διαφορική μορφή των όρων είναι:

$$dW_e = dW_m + dW_f + dW_{loss}$$

και

$$dW_m = dW_e + dW_f + dW_{loss} \qquad (4.1)$$

όπου: dW_e η στοιχειώδης ηλεκτρική ενέργεια, dW_m

Σχ. 4.2

Ενεργειακοί μετατροπείς, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας

Σχ. 5.20
Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα

Σχ. 5.21
Συνολικό μαγνητικό πεδίο μηχανής ΣΡ στη λειτουργία με φορτίο

Φ_f : Μαγνητική ροή των κύριων μαγνητικών πόλων του στάτη.
Φ_a : Μαγνητική ροή του δρομέα.
Φ_t : Συνολική μαγνητική ροή στον διάκενο χώρο της μηχανής.

Σχ. 5.22
(α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής Φ_f στη λειτουργία χωρίς φορτίο και (β) γραφική παράσταση των μαγνητικών ροών στη λειτουργία με φορτίο

εφαπτομένης $ΟΓ = \frac{225}{1,5} = 150\,Ω$.

3) Η τάση χωρίς φορτίο της γεννήτριας ΣΡ στις 1.200 ΣΑΛ είναι $\left(\frac{1.200}{1.500}\right)$ ή 0,8 φορές της αντίστοιχης τιμής στις 1.500 ΣΑΛ.

Σχ. 5.52

Τα δεδομένα των τιμών (I_f, E_a) για την χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής (καμπύλη ΙΙ), της γεννήτριας ΣΡ, όταν αυτή περιστρέφεται με 1.200 ΣΑΛ, δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

$I_f[A]$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3
$E_a[V]$	4,8	48	96	138	162	176,8	184,8	189,6	192

Άσκηση 3

Τα δεδομένα της στατικής χαρακτηριστικής μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, όταν αυτή περιστρέφεται με 1.000 ΣΑΛ, δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

$I_f[A]$	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$E_a[V]$	36	72	138	188	225	250	270

Να υπολογίσετε:

1) Την τιμή της αντίστασης του τυλίγματος διέγερσης όταν η τάση χωρίς φορτίο είναι 240 V.

2) Τον κρίσιμο αριθμό στροφών n_c, της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Λύση.

Από τα δεδομένα του πίνακα των τιμών (I_f, E_a)

Σχ. 5.53

κατασκευάζουμε την στατική χαρακτηριστική της γεννήτριας με παράλληλη διέγερση (σχ. 5.53).

1) Η τάση χωρίς φορτίο είναι: $E_a = 240\,V$. Φέρουμε την οριζόντια γραμμή από την τιμή της τάσης 240 V, η οποία κόβει στο σημείο Α την στατική χαρακτηριστική. Σε αυτό το σημείο τομής αντιστοιχεί το ρεύμα διέγερσης 2,25 A. Η κλίση της χαρακτηριστικής ευθείας ΟΑ, αντιστοιχεί στην τιμή της αντίστασης διέγερσης. Οπότε είναι:

$$R_f = \frac{240}{2,25} = 106,67\,Ω.$$

2) Χαράσσουμε την εφαπτομένη ΟΒ στη στατική χαρακτηριστική όταν η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι $n_1 = 1.000$ ΣΑΛ. Επιλέγουμε το ρεύμα διέγερσης 1 A (σημείο Γ). Φέρουμε την κάθετο στο σημείο Γ η οποία κόβει την εφαπτομένη ΟΒ στο σημείο Δ και την χαρακτηριστική ευθεία ΟΑ στο σημείο Ζ. Η κρίσιμη τιμή n_c, προσδιορίζεται ως εξής:

$$\frac{ΓΖ}{ΓΔ} = \frac{n_c}{n_1} \text{ και } n_c = \frac{ΓΖ}{ΓΔ} n_1 = \frac{105}{159} 1.000 \cong 660 \text{ ΣΑΛ}.$$

Οπότε, ο κρίσιμος αριθμός στροφών της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι 660 ΣΑΛ.

Άσκηση 4

Η αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου μιας γεννήτριας ανεξάρτητης διέγερσης, 50 kW, 250 V είναι 0,025 Ω.

πεδίο δημιουργείται από το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο είναι τοποθετημένο στους μαγνητικούς πόλους [σχ. 5.90(β)].

Οι κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες αναπτύσσουν μεγάλη ροπή, ενώ η σχέση ροπής-ταχύτητας είναι γραμμική.

Σχ. 5.90
Κινητήρας ΣΡ (α) με μόνιμους μαγνήτες και (β) με τυλίγματα διέγερσης στους μαγνητικούς πόλους

5.11 Βλάβες, αιτίες και επισκευές των μηχανών ΣΡ

Στον πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι βλάβες, οι αιτίες και οι τρόποι επισκευής τους.

Πίνακας 5.11
Βλάβες, πιθανές αιτίες και τρόποι επισκευής μηχανών ΣΡ

Α/Α	*Βλάβη*	*Πιθανή αιτία*	*Επισκευή (ή τι πρέπει να κάνουμε)*
1.	Η γεννήτρια ΣΡ δεν δίνει τάση.	α) Βλάβη στο μαγνητικό πεδίο.	Έλεγχος αντίστασης κυκλώματος διέγερσης.
		β) Λάθος σύνδεση των τυλιγμάτων διέγερσης.	Σωστή σύνδεση των ακροδεκτών των πηνίων διέγερσης.
		γ) Αντίστροφη φορά περιστροφής.	Αλλαγή φοράς περιστροφής (συνήθως δεν γίνεται). Αλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου ή του δρομέα μόνον.
		δ) Ο παραμένων μαγνητισμός είναι ασθενικός.	Ενίσχυση του παραμένοντος μαγνητισμού με τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης από εξωτερική πηγή. (βλ. όμως και 1γ).
		ε) Βραχυκύκλωμα στην κατανάλωση.	Απομόνωση της γεννήτριας, ώστε να δώσει τάση. Έλεγχος των φορτίων.
		στ) Το τύλιγμα του δρομέα έχει διακοπεί ή έχει γίνει βραχυκύκλωμα στο εσωτερικό της μηχανής.	Έλεγχος του τυλίγματος. Επισκευή της γεννήτριας σε ειδικό συνεργείο για νέα περιέλιξη.
2.	Η γεννήτρια έχει μεγάλη πτώση τάσης όταν φορτισθεί.	α) Μεγάλη πτώση αριθμού στροφών της κινητήριας μηχανής.	Ρύθμιση της κινητήριας μηχανής στην ονομαστική ταχύτητα.
		β) Λάθος σύνδεση της σύνθετης διέγερσης.	Σωστή σύνδεση των δύο τυλιγμάτων διέγερσης.
		γ) Λάθος θέση ψηκτρών.	Διόρθωση (μετάθεση) των ψηκτρών. (βλ. όμως και 3β).
3.	Σπινθηρισμός των ψηκτρών κατά τη φόρτιση.	α) Ρύπανση ή ανωμαλίες στην επιφάνεια του συλλέκτη.	Καθαρισμός ή λείανση.
		β) Λάθος θέση ψηκτρών.	Διόρθωση (μετάθεση) των ψηκτρών, (βλ. και 2γ).

Σχ. 6.3
Δρομέας και στάτης γεννήτριας με κυλινδρικό δρομέα

Σχ. 6.4
Στροβιλογεννήτρια

τούνται με συνεχές ρεύμα από:

1) Τη διεγέρτρια (σχ. 6.1 και παράγρ. 5.5.2).

2) Το στατό σύστημα διέγερσης (σχ. 6.5).

3) Το περιστρεφόμενο σύστημα διέγερσης άνευ ψηκτρών (brushless) (σχ. 6.6).

6.3.1 Στατό σύστημα διέγερσης

Το ρεύμα διέγερσης παράγεται τροφοδοτώντας τα τυλίγματα διέγερσης της γεννήτριας με ένα σύστημα συνεχούς τάσης, την οποία παίρνουμε από μία ανορθωτική διάταξη (γέφυρα Graetz ή από γέφυρα θυρίστορ). Το συνεχές ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας διέρχεται ένα ζευγάρι ψηκτρών-δακτυλιδιών και στη συνέχεια κυκλοφορεί στο κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας (σχ. 6.5).

Το στατό σύστημα διέγερσης (σχ. 6.5) περιλαμβάνει:

– Το κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας (1).
– Το σύστημα ψηκτρών-δακτυλιδιών (2).
– Την γέφυρα θυρίστορ (3).
– Τον ρυθμιστή τάσης (4) και
– την γωνία ρύθμισης των θυρίστορ (5).

Με τον όρο στατό σύστημα διέγερσης εννοούμε ότι το ρεύμα διέγερσης παράγεται από κυκλωματικά στοιχεία και διατάξεις, οι οποίες δεν είναι περιστρεφόμενες.

Ο ρυθμιστής τάσης (VR) συγκρίνει την πραγματική παραγόμενη τάση της γεννήτριας και τη συγκρίνει με μία τάση αναφοράς V*.

Το σφάλμα που προκύπτει απ' την παραπάνω σύγκριση προσδιορίζει την γωνία έναυσης α, των θυρίστορ για να παραχθεί η κατάλληλη τάση διέγερσης.

Σχ. 6.5
Στατό σύστημα διέγερσης

Σχ. 6.6
Σύστημα διέγερσης brushless

Ένα μειονέκτημα του στατού συστήματος διέγερσης είναι η παρουσία των ψηκτρών και των δακτυλιδιών που περιορίζουν την ποσότητα ρεύματος και αυξάνουν το κόστος συντήρησης.

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος στους ακρο-

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} = \frac{180^\circ}{15} = 12^\circ$$

και $$K_d = \frac{n\mu\left(\frac{m\gamma}{2}\right)}{mn\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{n\mu\left(5\frac{12}{2}\right)}{5n\mu\left(\frac{12}{2}\right)} = 0{,}957.$$

Άσκηση 2

Δίδεται τριφασική 4-πολική σύγχρονη γεννήτρια, η οποία έχει 36 αυλάκια στο επαγωγικό τύμπανο. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί τυλίγματα κλασματικού βήματος με διαφορά ένα αυλάκι από εκείνα του πλήρους βήματος. Να υπολογίσετε τον συντελεστή K_p.

Λύση

Είναι: $$n = \frac{\text{αυλάκια}}{\text{πόλοι}} = \frac{36}{4} = 9$$

$$\gamma = \frac{180^\circ}{9} = 20^\circ.$$

Αν $\alpha = 20^\circ$ τότε:

$$\alpha = \text{γωνία κλασματικού βήματος} = 20^\circ$$

$$K_p = \text{συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \text{συν}(10^\circ) = 0{,}9848.$$

6.6.2 Τρόπος 2ος: Ανάπτυξη τάσης σε συγκεντρωμένο τύλιγμα

Για τον υπολογισμό της επαγόμενης τάσης στα συγκεντρωμένα τυλίγματα μιας σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές.

1) Θεωρούμε τη στοιχειώδη σύγχρονη γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα. Πράγματι, θεωρούμε μηχανές με μικρό μήκος διακένου και σταθερό σε σχέση με την διάμετρο του δρομέα, οπότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι σταθερή κατά μήκος του διακένου.

2) Θεωρούμε το συγκεντρωμένο τύλιγμα με πλευρές (a, a′) (σχ. 6.27), οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 180 ηλεκτρικές μοίρες.

3) Το μαγνητικό πεδίο υφίσταται αποκλειστικά στον διάκενο χώρο της μηχανής.

4) Η μαγνητική ροή στο διάκενο χώρο είναι ακτινική.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B, θεωρείται ημιτονοειδής (σχ. 6.28), στον διάκενο χώρο της μηχανής.

– Υπολογισμός της μαγνητικής ροής Φ(t)

Η μαγνητική ροή εμπλέκει το τύλιγμα a-a′ τη χρονική στιγμή την οποία η πλευρά a βρίσκεται στη θέση α(t) (σχ. 6.29).

Σχ. 6.27
Στοιχειώδης σύγχρονη γεννήτρια

Σχ. 6.28
Πυκνότητα μαγνητικής ροής B, η οποία σαρώνει το τύλιγμα a-a′ του επαγωγικού τυμπάνου

Σχ. 6.29
Θέση του τυλίγματος a-a′ την χρονική στιγμή t ως προς την πυκνότητα μαγνητικής ροής B

Σχ. 6.56

$$\text{ή} \quad \frac{\text{συνφ}'}{\text{ημφ}'} = \frac{12,94}{16,51} \quad \text{ή} \quad \text{σφφ}' = 0,78.$$

Είναι: $\text{σφφ}' = \dfrac{1}{\text{εφφ}'} = 0,78$ ή $\text{εφφ}' = \dfrac{1}{0,78} = 1,28$

$$\text{εφ}^{-1}1,28 = 52^\circ \equiv \varphi'.$$

Το ρεύμα I_a' απ' την εξίσωση 5 είναι:

$$I_a'\,\text{συνφ}' = 12,94 \quad \text{ή} \quad I'_a = \frac{12,94}{\text{συν}52^\circ} = 21,21\ \text{A}.$$

Η άεργος ισχύς είναι:

$$Q = 3V_tI_a'\,\text{ημφ}' =$$
$$= 3 \cdot 127 \cdot 21,21 \cdot 0,78 = 6,368\ \text{kVar}$$

Ο συντελεστής ισχύος συνφ′ είναι:

$$\text{συν}52^\circ = 0,61\ \text{επαγ..}$$

3) Το όριο ευστάθειας της γεννήτριας είναι $\delta = 90^\circ$. Η ισχύς στο όριο ευστάθειας είναι:

$$P_{dmax} = \frac{3V_tE_f}{Xs}\,\text{ημ}90^\circ = \frac{3 \cdot 127 \cdot 214 \cdot 1}{7} = 11,648\ \text{kW}.$$

Στο όριο ευστάθειας ισχύει το ακόλουθο διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας (σχ. 6.57):

Οπότε:

$$I_a = \frac{\sqrt{E_f^2 + V_t^2}}{X_s} = \frac{\sqrt{(214)^2 + (127)^2}}{7} = 35,55\ \text{A}$$

$$\text{εφφ} = \frac{V_t}{E_f} = 0,59\ \text{χωρ.} \quad \text{ή} \quad \text{εφ}^{-1}0,59 = \varphi = 30,54^\circ$$

και $\quad \text{συνφ} = \text{συν}\,30,54 = 0,86\ \text{χωρ..}$

Σχ. 6.57

Άσκηση 7

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 1.000 kVA, 3.300 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα. Η ανά φάση ωμική αντίσταση τυμπάνου και η ανά φάση σύγχρονη αντίδραση είναι 0,2 Ω και 5 Ω αντίστοιχα. Η γεννήτρια παρέχει τα ονομαστικά kVA με ονομαστική τάση σε φορτία με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Να υπολογίσετε την τερματική τάση, ανά φάση, της γεννήτριας όταν παρέχει τα ονομαστικά της στοιχεία, με το ίδιο ρεύμα διέγερσης σε φορτία με συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ..

Λύση

Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας είναι:

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν τα σημαντικότερα μέρη της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου. Στον παρόντα τόμο των Ηλεκτρικών Μηχανών εξετάζονται οι βασικές έννοιες των μαγνητικών πεδίων, της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και η εφαρμογή τους σε στοιχειώδεις, απλοποιημένες ηλεκτρικές μηχανές, οι μονοφασικοί και τριφασικοί μετασχηματιστές, η λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος, οι βασικές έννοιες που διέπουν την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα, οι εφαρμογές των βασικών αρχών της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας στις διάφορες κατηγορίες των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος και η λεπτομερής ανάλυση της συμπεριφοράς τους, καθώς και η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας.

ISBN (SET) 978-960-337-180-9
ISBN 978-960-337-181-6