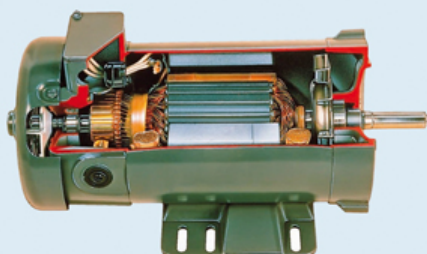
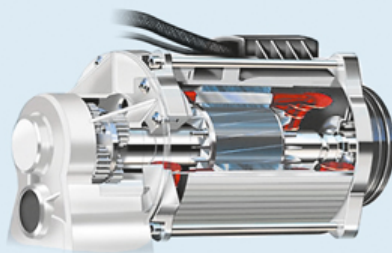
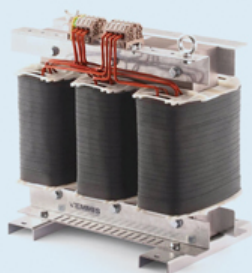


Αθανάσιος Ν. Σαφάκας
Ομότιμος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Ηλεκτρικές Μηχανές



ISBN 978-960-456-521-4

© Copyright, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθανάσιος Σαφάκας, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2019

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη και του συγγραφέα κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΙΚΕ
18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:
Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:
Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Το παρόν βιβλίο περιλαμβάνει βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού, τα οποία αποτελούν τα θεμέλια της ανάλυσης των μετασχηματιστών και των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Επίσης παρατίθενται τα απαραίτητα κατασκευαστικά στοιχεία για την κατανόηση της δομής αυτών των μηχανών, χωρίς να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι η λεπτομερής περιγραφή των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών αποτελεί ένα εκτεταμένο θέμα και απαιτεί αυτοτελές συγγραφικό έργο.

Η ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς, κυρίως στη μόνιμη κατάσταση, βασίζεται στα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα και διαχρονικά σε κάθε μελέτη των στατών και στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Αυτά τα ισοδύναμα κυκλώματα παριστάνουν τα μαθηματικά μοντέλα που αποδίδουν τις φυσικές ιδιότητες των μηχανών και συνδέονται άρρηκτα με την κατασκευαστική δομή των.

Η παραγωγή, η μεταφορά και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω των κατάλληλων ηλεκτρικών μηχανών. Τούτο καθιστά απόλυτα προφανή την αναγκαιότητα της βαθιάς επιστημονικής και τεχνολογικής γνώσης, η οποία άρχισε να παράγεται από τα μέσα του δεκάτου ενάτου αιώνα και σημείωσε μεγάλη πρόοδο στον εικοστό αιώνα. Παρόλο που η πρόοδος σε αυτόν τον τομέα έχει φτάσει σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο, η ερευνητική εργασία συνεχίζεται και αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόκληση για τους μηχανικούς. Οι εξελίξεις στον τομέα των μαγνητικών και μονωτικών υλικών, οι νέες μέθοδοι ανάλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η χρήση των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι προηγμένες τεχνικές λογισμικού, προσφέρουν δυνατότητες βελτίωσης της κατασκευής και αύξησης των σημαντικών δεικτών, όπως είναι η αναλογία βάρους προς ισχύ.

Οι μετασχηματιστές μετασχηματίζουν την εναλλασσόμενη τάση ορισμένης στάθμης σε μία άλλη επιθυμητή στάθμη καθιστώντας δυνατή τη σύνδεση μιας πηγής με το εκάστοτε φορτίο, που πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές. Το μέγεθος των μετασχηματιστών, ανάλογα με τη μεταφερόμενη ισχύ, εκτείνεται από πολύ μικρές μέχρι εξαιρετικά μεγάλες τιμές με παράλληλη αύξηση του βαθμού απόδοσης. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως ως μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Η διαστασιολόγησή τους εκτείνε-

ται από μερικά mW έως μερικές δεκάδες MW. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η επίτευξη της εύκολης ελεγχιμότητάς της, γεγονός που, συνήθως, την καθιστά πλεονεκτικότερη έναντι των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος.

Το βιβλίο τούτο προορίζεται πρωτίστως για τη διδασκαλία των ηλεκτρικών μηχανών σε μηχανικούς αλλά και σε κάθε άλλο επίπεδο ενδιαφερομένων, είτε σε χώρους διδασκαλίας και έρευνας, είτε σε ποικίλες εφαρμογές όπως είναι οι διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς. Το περιεχόμενό του προέρχεται από τις σημειώσεις του συγγραφέα, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την πολυετή διδασκαλία του στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Οι σημειώσεις αυτές βασίστηκαν, κυρίως, σε μερικά επιλεγμένα γερμανικά συγγράμματα, για τα οποία, μπορεί να ισχυρισθεί κανείς ότι απέκτησαν διαχρονική αξία, και πλέον αποτελούν κλασικές βιβλιογραφικές πηγές. Οι ιδέες, το σκεπτικό, τα σχήματα και οι φωτογραφίες, που προέρχονται από αυτές τις πηγές, επισημαίνονται σε κάθε βήμα του κειμένου, με ιδιαίτερη προσοχή, με αντίστοιχες παραπομπές. Η διδακτική και ερευνητική σκέψη του συγγραφέα είναι έντονα επηρεασμένες από αυτήν τη βιβλιογραφία λόγω των σπουδών του και της ερευνητικής δραστηριότητάς του στο Πανεπιστήμιο Καρλσρούης της Γερμανίας (η αρχική ονομασία ήταν «Technische Hochschule Karlsruhe» και ακολούθως ονομάστηκε «Universität Karlsruhe») κατά το χρονικό διάστημα 1961-1974. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός συγγράμματος για τις ηλεκτρικές μηχανές χρήσιμου για διδάσκοντες και διδασκόμενους στην Ελλάδα. Με την ελπίδα ότι επετεύχθη αυτός ο στόχος, παραδίδεται το βιβλίο στους ενδιαφερόμενους αναγνώστες.

Και από τη θέση αυτή επιθυμώ να ευχαριστήσω τους συνεργάτες μου για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους επί του κειμένου (εκφραστικές και ουσιαστικές παρατηρήσεις). Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον διδάκτορα μηχανικό για τη γραφή του προγενέστερου κειμένου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, κ. Κωνσταντίνο Γεωργάκα όλης της ύλης. Επίσης ευχαριστώ τους συνεργάτες μου κ. Μελπομένη Τσεμπερλίδου, ηλεκτρολόγο μηχανικό και τον διδάκτορα μηχανικό κ. Ευάγγελο Μίμο, που πολύ ευγενικά προσφέρθηκαν και έγραψαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μεγάλο μέρος του κειμένου.

Πάτρα 2019

Αθανάσιος Ν. Σαφάκας

Θεμελιώδεις Έννοιες Εναλλασσόμενων Ρευμάτων

1. Ορισμοί	3
2. Μιγαδική παράσταση εναλλασσόμενων ρευμάτων	6
3. Διανυσματικό διάγραμμα	9
4. Ισχύς μονοφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος	10
5. Φυσική σημασία των διαφόρων εννοιών ισχύος	11
6. Τριφασικό ημιτονοειδές ρεύμα	15
7. Ισχύς τριφασικού ρεύματος	15
8. Ονομαστικά μεγέθη	17

Μέρος Α

Γενικές έννοιες, Μετασχηματιστές, Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Κεφάλαιο Α.1. Εισαγωγή

A.1.1. Ο σκοπός και η εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών	21
A.1.2. Ρεύμα, Τάση, Ηλεκτρικό πεδίο	24
A.1.3. Θεμελιώδεις έννοιες του μαγνητικού πεδίου	27
A.1.4. Ο νόμος του διαρρέυματος	30
A.1.5. Μαγνητική ροή, επαγωγιμότητα	31
A.1.6. Μαγνητική ενέργεια	34
A.1.7. Ο νόμος της επαγωγής	36
A.1.8. Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις	43
A.1.8.1. Δύναμη επί ρευματοφόρου αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου	43
A.1.8.2. Δυνάμεις επί ενός πηνίου εντός μαγνητικού πεδίου	44
A.1.8.3. Δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτρικών αγωγών	47
A.1.8.4. Δύναμη επί ενός σιδηροπυρήνα εντός μαγνητικού πεδίου	49
A.1.9. Απώλειες ενέργειας στο σίδηρο	50
A.1.9.1. Απώλειες υστέρησης	50

A.1.9.2. Απώλειες δινορευμάτων	53
A.1.10. Σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων	54
A.1.10.1. Ορισμός ροής σκέδασης	54
A.1.10.2. Σκέδαση δύο τυλιγμάτων	56
A.1.10.2.1. Μετασχηματιστής	58
A.1.10.2.2. Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές	59

Κεφάλαιο Α.2. Μετασχηματιστές (ΜΤ)

A.2.1. Γενικά	61
A.2.2. Βασική κατασκευή των μετασχηματιστών	62
A.2.2.1. Πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή	62
A.2.2.2. Πυρήνας τριφασικού μετασχηματιστή	64
A.2.2.3. Τυλίγματα μετασχηματιστών	66
A.2.2.4. Ψύξη μετασχηματιστών	68
A.2.3. Εξισώσεις τάσεων και ισοδύναμα κυκλώματα του μονοφασικού μετασχηματιστή	72
A.2.4. Λειτουργία του μετασχηματιστή	76
A.2.4.1. Λειτουργία εν κενώ	76
A.2.4.2. Λειτουργία μετασχηματιστή σε βραχυκύκλωμα	79
A.2.4.3. Λειτουργία μετασχηματιστή υπό φορτίο	81
A.2.4.4. Μεταβολή της τάσης μετασχηματιστή υπό φορτίο	83
A.2.4.5. Απώλειες και βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή	86
A.2.4.6. Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών	87
A.2.4.7. Ισχύς μετασχηματιστή ως συνάρτηση του όγκου	90
A.2.4.8. Αυτομετασχηματιστής (ΑΜΤ)	92
A.2.4.9. Μετασχηματιστής ρεύματος	97
A.2.5. Τριφασικός μετασχηματιστής	99
A.2.5.1. Ομάδες συνδεσμολογίας μετασχηματιστών	99
A.2.5.2. Χρησιμοποίηση των συνδεσμολογιών	104
A. A. Αστέρας	104
B. Τρίγωνο	105
Γ. Τεθλασμένος αστέρας	105
A.2.5.3. Φόρτιση τριφασικού μετασχηματιστή	106
A.2.5.4. Ρεύματα πρωτεύοντος κατά τη φόρτιση του δευτερεύοντος με δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο σύστημα	107
A.2.5.5. Φόρτιση με σύστημα μηδενικής φάσης	109

A.2.5.6. Ρεύμα μαγνήτισης	111
A. Μονοφασικός μετασχηματιστής	111
B. Τριφασικός Μετασχηματιστής	112
A.2.6. Μεταβατικά φαινόμενα μετασχηματιστή	113
A.2.6.1. Σύνδεση ενός μετασχηματιστή χωρίς φορτίο με το δίκτυο	113
A.2.6.2. Ρεύμα βραχυκύκλωσης	115
A.2.7. Θόρυβος μετασχηματιστών	119
A.2.8. Υπολογισμός της σκέδασης μετασχηματιστών	120
A.2.9. Το διευρυμένο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή	125
A.2.9.1. Μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων	125
A.2.9.2. Μονοφασικός μετασχηματιστής με τρία τυλίγματα	131
A.2.10. Θέρμανση μετασχηματιστή	133
A.2.11. Ειδικά θέματα μετασχηματιστών	137
A.2.11.1 Γενικές επισημάνσεις	137
A.2.11.2. Μετασχηματιστές μέγιστης ισχύος	138
A.2.11.3. Μετασχηματιστές μέσης τάσης	140
A.2.11.4 Μετασχηματιστές χαμηλής τάσης και χαμηλής ισχύος	141
A.2.11.5. Μετασχηματιστές μέτρησης υψηλών τάσεων ή υψηλών ρευμάτων	143

Κεφάλαιο A.3. Μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.)

A.3.1. Βασική κατασκευή	145
A.3.2. Παραγωγή συνεχούς τάσης	153
A.3.3. Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος	156
A.3.3.1. Βασικές έννοιες	156
A.3.3.2. Βροχοτύλιγμα	163
A.3.3.3. Ισοδυναμικές συνδέσεις βροχοτυλιγμάτων	168
A.3.3.4. Κυματοτύλιγμα	170
A.3.3.5. Ισοδυναμικές συνδέσεις κυματοτυλιγματος	172
A.3.3.6. Χρησιμοποίηση βροχοτυλιγμάτων και κυματοτυλιγμάτων	173
A.3.4. Τάση εξ επαγωγής, τάση στους ακροδέκτες, ρευματικό στρώμα και ηλεκτρομαγνητική ροπή	173
A.3.4.1. Τάση εξ επαγωγής	173
A.3.4.2. Τάση στους ακροδέκτες	175
A.3.4.3. Ρευματικό στρώμα	176
A.3.4.4 Ηλεκτρομαγνητική ροπή	177
A.3.5. Αντίδραση τυμπάνου	178

A.3.5.1. Επίδραση του πεδίου του τυμπάνου επί του πεδίου των πόλων ...	178
A.3.5.2. Καμπύλη ολικού μαγνητικού πεδίου	181
A.3.5.3. Χαρακτηριστική εν κενώ, υπό φορτίο, μαγνητικό κύκλωμα	185
A.3.5.4. Αντίδραση τυμπάνου κατά τη μετατόπιση των ψηκτρών	188
A.3.5.5 Επακόλουθα της αντίδρασης του τυμπάνου	191
A.3.5.6. Εξουδετέρωση της αντίδρασης του τυμπάνου	193
A.3.5.6.1. Βοηθητικοί πόλοι	193
A.3.5.6.2. Τύλιγμα αντιστάθμισης	194
A.3.5.6.3. Άλλες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της αντίδρασης του τυμπάνου	196
A.3.6. Αναστροφή ρεύματος τυμπάνου	197
A.3.6.1. Χρονική συνάρτηση ρεύματος κατά την αναστροφή του ρεύματος τυμπάνου	197
A.3.6.2. Δυνατότητες επηρεασμού του φαινομένου της αναστροφής του ρεύματος τυμπάνου	204
A.3.6.3. Σπινθηρισμοί μηχανών Σ.Ρ.	209
A.3.7. Μόνιμη λειτουργία μηχανών Σ.Ρ.	210
A.3.7.1. Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος	210
A.3.7.1.1. Γεννήτρια Σ.Ρ. ξένης διέγερσης	210
A.3.7.1.2. Γεννήτρια Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης	211
A.3.7.1.3. Γεννήτρια Σ.Ρ. με διέγερση σε σειρά	216
A.3.7.1.4. Γεννήτρια Σ.Ρ. διπλής διέγερσης	217
A.3.7.2. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	219
A.3.7.2.1. Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας – ηλεκτρομαγνητικής ροπής	219
A.3.7.2.2. Μηχανές Σ.Ρ. ξένης ή παράλληλης διέγερσης	220
A.3.7.2.3. Μηχανές με διέγερση σε σειρά	221
A.3.7.2.4. Μηχανές διπλής διέγερσης	222
A.3.7.2.5. Ρύθμιση των στροφών μηχανών Σ.Ρ.	223
A.3.7.2.5.1 Ρύθμιση μέσω της τάσης του τυμπάνου U_T	223
A.3.7.2.5.2. Ρύθμιση μέσω της μαγνητικής ροής Φ	224
A.3.7.2.5.3. Ρύθμιση μέσω της αντίστασης του τυμπάνου R_T	225
A.3.7.2.6. Σύστημα Ward-Leonard, για τη ρύθμιση του αριθμού στροφών μηχανής Σ.Ρ.	226
A.3.7.2.7. Βασικές διατάξεις ηλεκτρικών μετατροπών ισχύος για τη ρύθμιση των στροφών κινητήρων Σ.Ρ.	228
1. Μονοφασικός μετατροπέας	229
2. Τριφασικός μετατροπέας	229

A.3.8.	Πέδηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	232
A.3.8.1.	Πέδηση με την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας	232
A.3.8.2.	Πέδηση με ωμική αντίσταση	232
A.3.8.3.	Πέδηση με αλλαγή της πολικότητας της τάσης του τυμπάνου	233
A.3.9.	Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	234
Βιβλιογραφία Ηλεκτρικών Μηχανών Μέρους Α		238

Ασκήσεις: Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Α

A.	Προβλήματα προς λύση	245
B.	Υποδειγματικές λύσεις	256
Γ.	Υποδειγματικές ασκήσεις γραπτής εξέτασης	263

Μέρος Β

Ασύγχρονες μηχανές, Σύγχρονες Μηχανές

Κεφάλαιο Β.1. Ασύγχρονες μηχανές (Α.Μ.)

B.1.1.	Βασικές αρχές κατασκευής Α.Μ.	269
B.1.2.	Τυλίγματα Α.Μ.	274
B.1.2.1.	Τυλίγματα μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος	274
B.1.2.2.	Τυλίγματα με μεταβλητό αριθμό πόλων	280
B.1.3.	Βασικές αρχές λειτουργίας Α.Μ.	281
B.1.4.	Μαγνητικά πεδία Α.Μ.	284
B.1.4.1.	Δημιουργία στρεφομένων πεδίων	284
B.1.4.2.	Στρεφόμενο πεδίο ενός τριφασικού τυλίγματος	285
B.1.4.3.	Υπολογισμός του ρευματικού στρώματος	290
B.1.4.3.1.	Ρευματικό στρώμα μιας φάσης	290
B.1.4.3.2.	Στρεφόμενο ρευματικό στρώμα	292
B.1.4.4.	Υπολογισμός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου	292
B.1.5.	Λειτουργία Ασύγχρονης Μηχανής	294
B.1.5.1.	Συχνότητα και ολίσθηση	294
B.1.5.2.	Τάση, ρεύμα και αριθμός στροφών του δρομέα	296
B.1.5.3.	Εξισώσεις τάσεων Α.Μ. και ισοδύναμο κύκλωμα	297
B.1.6.	Κατανομή ισχύος Α.Μ. και ηλεκτρομαγνητική ροπή	300
B.1.6.1.	Διάγραμμα ισχύος κατά Sankey	300

B.1.6.2. Ισολογισμός ισχύος Α.Μ.	302
B.1.6.3. Υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής	304
B.1.6.4. Διερεύνηση της μαθηματικής παράστασης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής	305
B.1.6.5. Ροπή M_e για $r_s = 0$	307
B.1.6.6. Διαγράμματα ροπής, ρεύματος, ισχύος	309
B.1.7. Εκκίνηση, σταθερή κινητική κατάσταση, ευστάθεια ενός ασύγχρονου κινητήρα	312
B.1.8. Μέθοδοι εκκίνησης Α.Μ.	316
B.1.8.1. Χρόνος εκκίνησης	316
B.1.8.2. Θερμική ενέργεια κατά την εκκίνηση	317
B.1.8.3. Εκκίνηση Α.Μ. με δακτυλιοφόρο δρομέα	318
B.1.8.4. Εκκίνηση Α.Μ. με τη μέθοδο «αστέρας - τρίγωνο»	319
B.1.8.5. Εκκίνηση Α.Μ. μέσω ενός μετασχηματιστή	320
B.1.8.6. Εκκίνηση με μια αντίσταση στον στάτη ή με μονοφασικό αυτομετασχηματιστή	321
B.1.8.7. Εκκίνηση Α.Μ. μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος	321
B.1.9. Η ασύγχρονη μηχανή ως μετασχηματιστής	325
B.1.10. Γεωμετρικός τόπος των ρευμάτων Α.Μ.	327
B.1.11. Μόνιμη λειτουργία Α.Μ. με βραχυκυκλωμένο δρομέα	332
B.1.11.1. Βασική θεωρία	332
B.1.11.2. Εκμετάλλευση του επιδερμικού φαινομένου στις Α.Μ. με κλωβό	336
B.1.12. Ανώτερες αρμονικές του μαγνητικού πεδίου και επιδράσεις αυτών επί της λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής	339
B.1.12.1. Θεμελιώδεις νόμοι των ανώτερων αρμονικών	339
B.1.12.2. Ροπές ανώτερων αρμονικών	342
α) Ασύγχρονες ανώτερες ροπές	343
β) Σύγχρονες ανώτερες ροπές	344
γ) Δυνάμεις ανώτερων αρμονικών	345
B.1.12.3. Αντιμετώπιση των ανωτέρων αρμονικών	346

Κεφάλαιο Β.2. Σύγχρονες Μηχανές (Σ.Μ.)

B.2.1. Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία	349
B.2.2. Ψύξη Σ.Μ.	356
B.2.3. Διέγερση Σ.Μ.	359
B.2.4. Σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα (κατανεμημένο τύλιγμα)	363

B.2.4.1. Καμπύλη πεδίου και χαρακτηριστική εν κενώ	364
B.2.4.2. Εξισώσεις Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα, ισοδύναμο κύκλωμα, διανυσματικό διάγραμμα	367
B.2.4.3. Ηλεκτρομαγνητική ροπή Σ.Μ.	373
B.2.4.4. Σημασία της πολικής γωνίας θ , ή γωνίας φορτίου, ή γωνίας ισχύος	378
B.2.4.5. Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας Σ.Μ.	380
B.2.4.6. Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο	382
B.2.4.7. Γεωμετρικός τόπος του ρεύματος \vec{I}_S	386
B.2.4.8. Αντίδραση τυμπάνου και ρεύμα μαγνήτισης	388
B.2.4.9. Μεταβολή της τάσης της σύγχρονης γεννήτριας	393
B.2.4.10. Βραχυκύκλωμα Σ.Μ.	394
B.2.4.10.1. Γενική περιγραφή	394
B.2.4.10.2. Μόνιμο τριπολικό βραχυκύκλωμα	395
B.2.4.10.3. Αναλογία «κενού - βραχυκυκλώματος»	396
B.2.4.10.4. Κρουστικό βραχυκύκλωμα	398
B.2.4.11. Χαρακτηριστική αέργου φόρτισης ($\cos\varphi=0$)	399
B.2.4.12. Χαρακτηριστικές φόρτισης Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα	403
B.2.5. Σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους	406
B.2.5.1. Διαμερισμός της διαρροής του στάτη	407
B.2.5.2. Προσδιορισμός των επαγωγισιμάτων στους άξονες d, q μιας Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	412
B.2.5.3. Εξίσωση τάσεων και διανυσματικό διάγραμμα Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	415
B.2.5.4. Σύγχρονες επαγωγικές αντιστάσεις Σ.Μ. με έκτυπους πόλους ...	422
B.2.5.5. Ηλεκτρομαγνητική ροπή Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	424
B.2.5.6. Κρουστικό ρεύμα βραχυκυλώματος στις Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	426
B.2.5.7. Γεωμετρικός τόπος του ρεύματος \vec{I}_S μίας Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	434
B.2.6. Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις των σύγχρονων μηχανών	437
B.2.6.1. Στατική ροπή συγχρονισμού	437
B.2.6.2. Στατική ευστάθεια	438
B.2.6.3. Δυναμική ευστάθεια	439
B.2.6.4. Εξίσωση κίνησης του ζεύγους Σ.Μ. και κινητήριας μηχανής	441
B.2.6.5. Ελεύθερες ταλαντώσεις	445
B.2.6.6. Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις Σ.Μ.	447
B.2.6.7. Ταλαντώσεις ισχύος	452

B.2.7. Εκκίνηση και παραλληλισμός Σ.Μ.	455
B.2.7.1. Ασύγχρονη εκκίνηση	455
B.2.7.2. Εκκίνηση με τη βοήθεια ενός κινητήρα	456
B.2.7.3. Εκκίνηση με μεταβλητή συχνότητα	456
B.2.7.4. Συγχρονισμός με το δίκτυο	456
B.2.8. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικά στοιχεία	458

Κεφάλαιο Β.3. Μονοφασικές Μηχανές

B.3.1. Μονοφασική σύγχρονη μηχανή	463
B.3.2. Μονοφασική ασύγχρονη μηχανή	465
B.3.2.1. Αρχές λειτουργίας	465
B.3.2.2. Εκκίνηση μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων	469
B.3.2.3. Μονοφασικοί κινητήρες με πυκνωτές	472

Βιβλιογραφία Ηλεκτρικών Μηχανών Μέρους Β	475
------------------------------------------------------	-----

Ασκήσεις: Ηλεκτρικές Μηχανές - Μέρος Β

A. Προβλήματα προς λύση	483
B. Υποδειγματικές λύσεις	491

Ευρετήριο όρων	505
----------------------------	-----

Θεμελιώδεις Έννοιες Εναλλασσόμενων Ρευμάτων

(Τάση, ρεύμα, ισχύς)

Κατά τη μόνιμη λειτουργία των μετασχηματιστών και των ηλεκτρικών μηχανών όλων των ειδών επικρατούν ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη, τα οποία είναι συναρτήσεις του χρόνου ή του τόπου ή τόπου και χρόνου, ημιτονοειδούς μορφής και χαμηλής συχνότητας.

Για την κατανόηση των λειτουργικών φαινομένων των μετασχηματιστών και των ηλεκτρικών μηχανών απαιτείται η γνώση των βασικών εννοιών των εναλλασσομένων ηλεκτρικών τάσεων και ρευμάτων, καθώς και η ισχύς που δημιουργείται από τις τάσεις και τα ρεύματα. Για τα μαγνητικά μεγέθη, δηλαδή τη μαγνητική ροή, τη μαγνητική επαγωγή και την ένταση του μαγνητικού πεδίου και άλλα συναφή μεγέθη, τα οποία είναι επίσης εναλλασσόμενα μεγέθη, ισχύει η ίδια θεωρηση.

Στο παράρτημα αυτό αναλύονται οι θεμελιώδεις έννοιες των ηλεκτρικών εναλλασσομένων μεγεθών, ώστε να υπάρχει η βάση για τη μελέτη των εξειδικευμένων θεμάτων, που αφορούν τους μετασχηματιστές και τις ηλεκτρικές μηχανές.

1. Ορισμοί

Εναλλασσόμενο ρεύμα (τάση) είναι περιοδικά μεταβαλλόμενο ρεύμα (τάση) ως συνάρτηση του χρόνου.

► Σπουδαιότερες κυματομορφές εναλλασσομένου ρεύματος

α) Ημιτονοειδής κυματομορφή

$$i(t) = i_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$i(t)$ = στιγμιαία τιμή,

i_m = εύρος (μέγιστη τιμή),

ω = $2\pi f$ [1/sec] κυκλική συχνότητα,

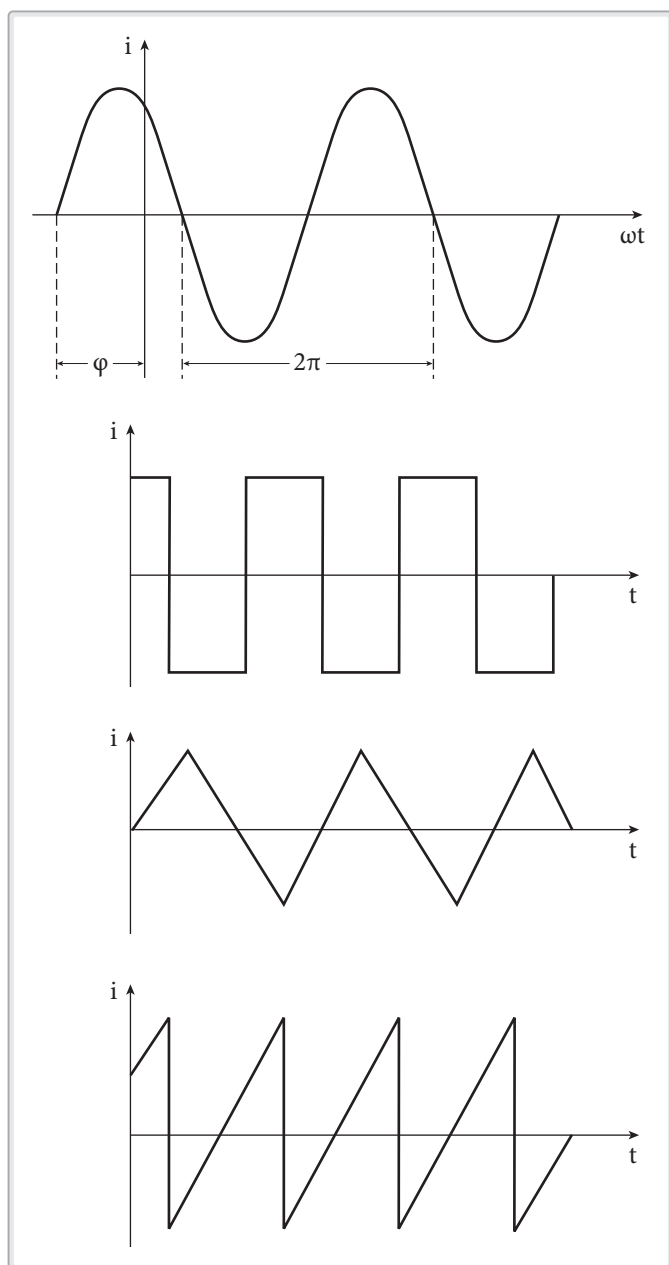
f = συχνότητα,

φ = διαφορά φάσης της μηδενικής τιμής του ρεύματος ως προς τη μηδενική τιμή του χρόνου.

β) Ορθογώνιος κυματομορφή

γ) Τριγωνική κυματομορφή

δ) Πριονωτή κυματομορφή



Σχήμα 1. Σπουδαιότερες κυματομορφές εναλλασσόμενου ρεύματος

Το συνεχές ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ως εναλλασσόμενο με συχνότητα μηδέν. Για την εναλλασσόμενη τάση ή μαγνητική ροή κ.λπ. ισχύουν οι ίδιοι ορισμοί.

► **Σπουδαιότερες τιμές ενός εναλλασσόμενου ρεύματος**

α) Στιγμιαία τιμή (συνάρτηση του χρόνου): $i(t)$

β) Μέση αριθμητική τιμή: $\overline{i(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$ (2)

γ) Μέση αριθμητική τιμή του ανορθωμένου εναλλασσόμενου ρεύματος:

$$\overline{i(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (3)$$

δ) Μέση τιμή του τετραγώνου ή ενεργός τιμή:

$$I = \overline{i^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (4)$$

Σημείωση:

- i) Η στιγμιαία τιμή ενός μεγέθους συμβολίζεται με μικρά (πεζά) γράμματα, ενώ η ενεργός τιμή με κεφαλαία.
- ii) Οι παραπάνω τιμές καταγράφονται ή μετρίενται με ειδικά όργανα. Με τον παλμογράφο παρακολουθούμε τη χρονική συνάρτηση ενός μεγέθους, ενώ τη μέση ή την ενεργό τιμή μετρούμε με κατάλληλα αναλογικά ή ψηφιακά όργανα.

Ειδικά για το ημιτονοειδές ρεύμα ισχύει:

$$\overline{i(t)} \equiv 0, \quad |\overline{i(t)}| = \frac{2}{\pi} i_m, \quad I = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

► **Συντελεστής μορφής**

$$g = \frac{\text{ενεργός τιμή}}{\text{μέση τιμή ανορθωμένου}} \quad (6)$$

Για ημιτονοειδή μεγέθη ισχύει: $g = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$.

Ο συντελεστής μορφής χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κυματομορφής, κυρίως για εναλλασσόμενα μη ημιτονοειδή μεγέθη.

► **Συντελεστής εύρους**

$$m = \frac{\text{μέγιστη τιμή}}{\text{ενεργός τιμή}} \quad (7)$$

Για ημιτονοειδή μεγέθη ισχύει: $m = \sqrt{2}$.

ΜΕΡΟΣ

A

Γενικές έννοιες,
Μετασχηματιστές,
Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Α.1.1 Ο σκοπός και η εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών

Για την παραγωγή, διανομή και τη χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας χρειαζόμαστε ηλεκτρικές μηχανές και μετασχηματιστές. Η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται διά μετατροπής από φυσικές πηγές που εμπεριέχουν την πρωτογενή ενέργεια, όπως είναι η μηχανική ενέργεια, η χημική ενέργεια και η θερμότητα. Αντίστροφα η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ή θερμική ενέργεια. Κυρίως οι ηλεκτρικές μηχανές είτε μετατρέπουν κινητική ενέργεια σε μηχανική και λέμε ότι λειτουργούν ως γεννήτριες, είτε μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική και τότε λέμε ότι λειτουργούν ως κινητήρες. Οι μετασχηματιστές μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια μιας πηγής κάποιας τάσης, κάποιου ρεύματος και κάποιας συχνότητας σε ηλεκτρική ενέργεια μιας άλλης τάσης και ενός άλλου ρεύματος αλλά της ίδιας συχνότητας. Αυτές οι διαδικασίες αποτελούν τη σπουδαιότερη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν και άλλες μορφές μετατροπής, όπως η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται υπό μια ορισμένη τάση, συχνότητα και αριθμό φάσεων σε μια μορφή ενέργειας υπό άλλη τάση, άλλη συχνότητα και άλλον αριθμό φάσεων. Επισημαίνεται ότι σε κάθε μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούνται απώλειες, και έτσι σε κάθε σύστημα μετατροπής η αποδιδόμενη ενέργεια είναι μικρότερη της προσλαμβανόμενης.

Υπάρχουν και άλλες διατάξεις που θεωρούνται ηλεκτρικές μηχανές και μετατρέπουν μηχανική ενέργεια πάλι σε μηχανική, όπως είναι οι ηλεκτρομαγνητικοί συμπλέκτες.

Σήμερα οι ηλεκτρικές μηχανές και οι μετασχηματιστές, δηλαδή οι σπουδαιότεροι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται σε ένα πολύ εξελιγμένο στάδιο, αλλά διαρκώς εξελίσσονται περαιτέρω, γεγονός που σημαίνει ότι γίνεται εντατική και πλατιά έρευνα σ' αυτήν την επιστημονική και τεχνολογική περιοχή.

Κεφάλαιο Α.2

Μετασχηματιστές (ΜΤ)

Α.2.1 Γενικά

Ο σπουδαιότερος σκοπός των μετασχηματιστών είναι η δημιουργία των κατάλληλων ηλεκτρικών τάσεων για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Χωρίς τη βοήθεια μετασχηματιστών θα ήταν αδύνατη η παροχή ενέργειας στους ποικίλους καταναλωτές από τις μονάδες παραγωγής τριφασικού ρεύματος μεγάλης ισχύος. Τούτο συμβαίνει διότι η τάση στους ακροδέκτες μιας μεγάλης γεννήτριας φθάνει περίπου μέχρι 30 kV και το ρεύμα ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ φθάνει μερικές δεκάδες kA. Λόγω των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς το εκάστοτε ρεύμα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Τούτο σημαίνει ότι πρέπει να υψωθεί η τάση για να μεταφερθεί η επιδιωκόμενη ισχύς. Οι καταναλωτές δέχονται την ισχύ υπό μικρή τάση, επομένως πρέπει η τάση να μετασχηματισθεί από την υψηλή τιμή της γραμμής μεταφοράς (π.χ. 400 kV) σε μια χαμηλότερη τάση (π.χ. 20 kV).

Το σύστημα συνεχούς ρεύματος ένεκα της αδυναμίας μετασχηματισμού και ένεκα της ανεπάρκειας των μηχανών συνεχούς ρεύματος, σε ό,τι αφορά την ισχύ, έπρεπε να παραμερισθεί όσον αφορά τη μεταφορά ενέργειας. Ο μετασχηματιστής έχει την ικανότητα να υψώνει την τάση της γεννήτριας σε μια επιθυμητή τιμή και έτσι να παρέχει την ικανότητα εύκολης μεταφοράς μεγάλης ισχύος (π.χ. 1.500 MVA) μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Στην τεχνική των ασθενών ρευμάτων (επεξεργασία και μεταφορά πληροφοριών, ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.λπ.) ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται, εκτός από την παροχή της επιθυμητής τάσης, για τη σύνδεση ενός καταναλωτή με μια δεδομένη πηγή, καθώς και για το διαχωρισμό ηλεκτρικών δυναμικών. Ακόμη ο ΜΤ παρέχει τη δυνατότητα της μαγνητικής ζεύξης δύο κυκλωμάτων και έτσι αποφεύγεται η ηλεκτρική (γαλβανική) σύνδεση. Στον ενεργειακό κλάδο ο ΜΤ χρησιμοποιείται, επίσης, για τη σύνδεση δύο δικτύων διαφορετικής τάσης π.χ. 400 kV και 150 kV.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές, ότι οι μετασχηματιστές παίζουν πρωταρχικό ρόλο σε όλα τα συστήματα του ηλεκτρισμού, τα δε μεγέθη αυτών ξεκινούν από πολύ μικρές και φθάνουν έως τεράστιες διαστάσεις.

A.2.2 Βασική κατασκευή των μετασχηματιστών

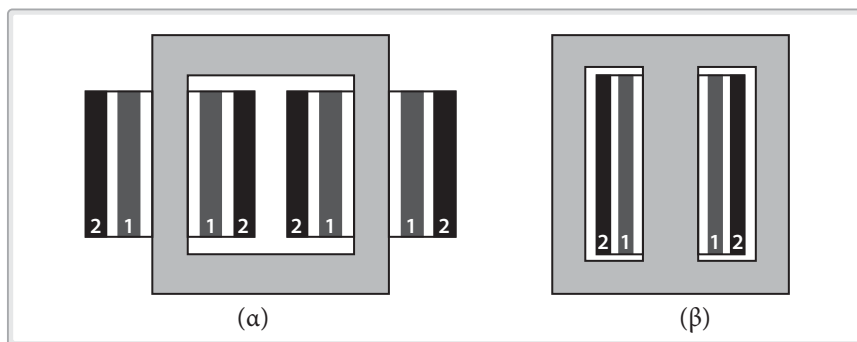
Ένας μετασχηματιστής αποτελείται, βασικά, από έναν πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό, ο οποίος σχηματίζεται από λεπτά ελάσματα. Γύρω από τον πυρήνα, τυλίγονται το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα.

Ως πρωτεύον χαρακτηρίζεται το τύλιγμα, το οποίο προσλαμβάνει ενέργεια, ως δευτερεύον εκείνο το οποίο αποδίδει ενέργεια. Ο πυρήνας είναι ο φορέας της εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής, η οποία διαρρέει και τα δύο τυλίγματα και επάγει σ' αυτά τάσεις ανάλογες προς τον αριθμό των σπειρών. Συνήθως κατασκευάζεται από ελάσματα σιδήρου πάχους 0,35 mm για τον περιορισμό των δινορευμάτων, τα οποία δημιουργούν αυξημένες απώλειες. Τα ελάσματα φέρουν στη μια πλευρά τους μονωτικό υλικό αποτελούμενο από λεπτό στρώμα χαρτιού ή μονωτικού βερνικιού και έτσι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους μόνωση.

A.2.2.1. Πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή

Υπάρχουν δύο είδη κατασκευής μονοφασικών μετασχηματιστών, τα οποία χαρακτηρίζονται από τη διαμόρφωση του σιδηρομαγνητικού υλικού, που ονομάζεται πυρήνας, και την τοποθέτηση των τυλιγμάτων επάνω σ' αυτόν: Ο μετασχηματιστής τύπου πυρήνα (σχήμα A.2.1.α) και ο μετασχηματιστής τύπου μανδύα (σχήμα A.2.1.β).

Στον μετασχηματιστή τύπου πυρήνα τα τυλίγματα είναι δυνατό να τοποθετούνται γύρω από δύο στελέχη, κατά τρόπο ώστε σε κάθε στέλεχος να υπάρχει ο μισός αριθμός σπειρών. Τα στελέχη ενώνονται μεταξύ τους με το ζύγωμα μετά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων. Τα στελέχη και το ζύγωμα αποτελούν τον σιδηρομαγνητικό πυρήνα.

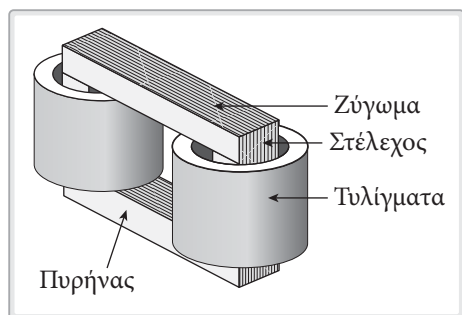


Σχήμα A.2.1. Τοποθέτηση τυλιγμάτων γύρω από τον πυρήνα.

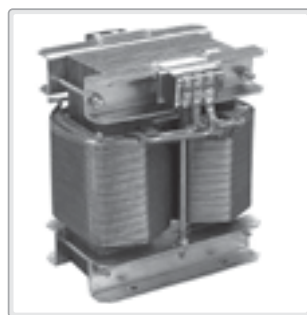
(α) MT τύπου πυρήνα, (β) MT τύπου μανδύα.

1. Τύλιγμα χαμηλής τάσης, 2. Τύλιγμα υψηλής τάσης.

Στον μετασχηματιστή τύπου μανδύα τα τυλίγματα τοποθετούνται επάνω στο μεσαίο στέλεχος και περιβάλλονται από τα δύο εξωτερικά στελέχη, σαν να περιβάλλονται από μανδύα. Η διατομή του μεσαίου στελέχους είναι διπλάσια της διατομής των δύο άλλων καθώς και των ζυγμάτων, επειδή η μαγνητική ροή του μεσαίου στελέχους είναι διπλάσια από τη ροή των άλλων τμημάτων (η ροή του μεσαίου στελέχους μοιράζεται σε δύο ίσα μέρη). Ο πυρήνας, γενικά, είναι ένα κράμα σιδήρου και πυριτίου. Τα ελάσματα φέρουν λεπτό στρώμα μονωτικού χαρτιού ή καλύπτονται με μονωτικό βερνίκι για να εξασφαλισθεί η μόνωση μεταξύ τους. Στα σχήματα (Α.2.1.1) και (Α.2.1.2) παρουσιάζεται ένας ΜΤ τύπου πυρήνα.

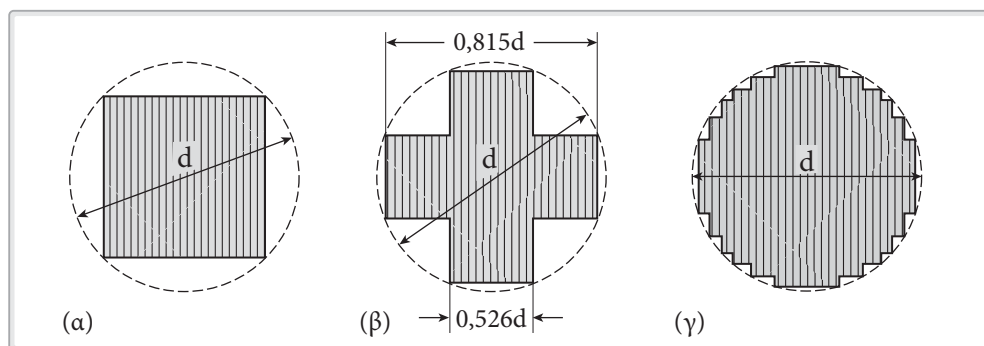


Σχήμα Α.2.1.1. Σχηματική παράσταση μονοφασικού ΜΤ τύπου πυρήνα [5].



Σχήμα Α.2.1.2. Κατασκευαστική εικόνα μονοφασικού ΜΤ τύπου πυρήνα [44].

Στους μετασχηματιστές μικρής ή μεσαίας ισχύος η διατομή του πυρήνα είναι τετραγωνική ή σταυροειδής, όπως δείχνουν τα σχήματα (Α.2.2.α) και (Α.2.2.β). Στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος χρησιμοποιείται ο πυρήνας του σχήματος (Α.2.2.γ).



Σχήμα Α.2.2. Διάφορες μορφές του πυρήνα ενός μετασχηματιστή: (α) και (β) για μετασχηματιστές μικρής και μέσης ισχύος (γ) για μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος.



Σχήμα Α.2.7.α. Μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης 150 kV/20 kV, 50 MVA, σε υποσταθμό της ΔΕΗ.



Σχήμα Α.2.7.β. Μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης 17 kV/400 kV, 339 MVA, σε θερμικό σταθμό παραγωγής της ΔΕΗ.



Σχήμα Α.2.7.γ. Πυρήνας και τυλίγματα τύπου μανδύα σε μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης 20 kV/ 400 V, 400 kVA, σε στάδιο επισκευής, συνεργείο ΔΕΔΔΗΕ.



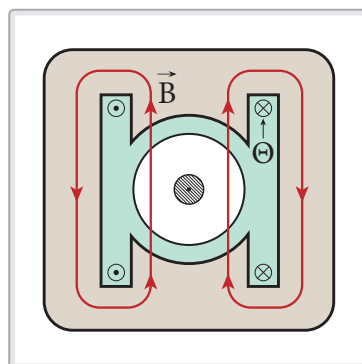
Σχήμα Α.2.7.δ. Πυρήνας και δισκοειδή τυλίγματα σε μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης 20 kV/ 400 V, 400 kVA, σε στάδιο επισκευής, συνεργείο ΔΕΔΔΗΕ.

Κεφάλαιο Α.3

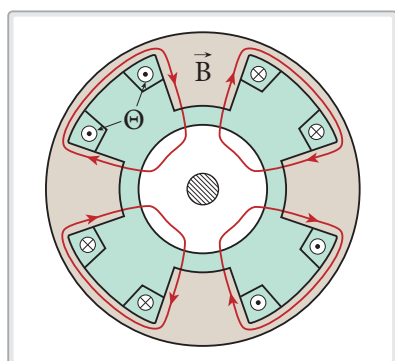
Μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.)

Α.3.1 Βασική κατασκευή

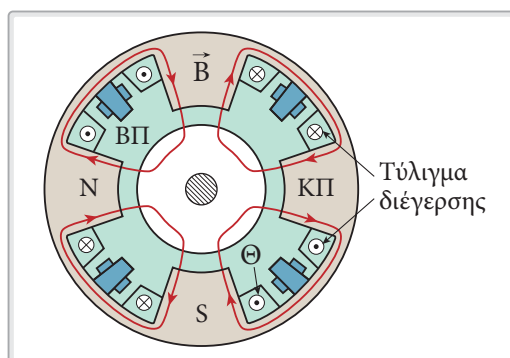
Η μηχανή συνεχούς ρεύματος είναι μηχανή εξωτερικών πόλων. Δηλαδή ο ηλεκτρομαγνήτης διέγερσης βρίσκεται επί του εξωτερικού ακίνητου μέρους που λέγεται στάτης, ενώ το επαγωγικό τύμπανο μαζί με τον συλλέκτη βρίσκεται επάνω στον δρομέα και περιστρέφεται μαζί με αυτόν. Παλαιότερα οι μηχανές συνεχούς ρεύματος είχαν τη μορφή του σχήματος (Α.3.1), στο οποίο παριστάνεται μια διπολική μηχανή περίπου τετραγωνικής μορφής, ενώ μεταγενέστερες κατασκευές έχουν τη μορφή των σχημάτων (Α.3.2) και (Α.3.3), όπου παρατηρούμε την κυκλική τομή [2, 11].



Σχήμα Α.3.1. Διπολική μηχανή παλαιού τύπου.



Σχήμα Α.3.2. Τετραπολική μηχανή κυκλικής τομής].



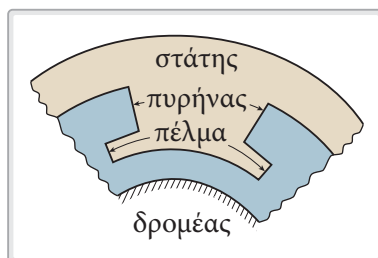
Σχήμα Α.3.3. Τετραπολική μηχανή Σ.Ρ. με βοηθητικούς πόλους ΒΠ.

Στα σχήματα αυτά παρατηρούμε κλειστές λεπτές γραμμές, οι οποίες συμβολίζουν χονδρικά την τροχιά που ακολουθούν οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου \vec{B} . Το πεδίο αυτό προέρχεται από το διάρρευμα Θ , το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα διέγερσης. Το δε πηνίο που προκαλεί τη διέγερση περιτυλίγει τους πόλους.

Στους νεότερους τύπους μηχανών τα ζυγώματα, τα οποία ενώνουν μαγνητικά τους πόλους, έχουν κυκλική μορφή για να μπορούμε να τοποθετούμε άνετα τους φορείς των εδράνων συνδέοντας τους με τα ζυγώματα.

Κατά κανόνα οι μηχανές συνεχούς ρεύματος φέρουν τουλάχιστον τέσσερις πόλους, των οποίων τη διάταξη δείχνουν τα σχήματα (Α.3.2) και (Α.3.3).

Το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται τοποθετημένο γύρω από τους κύριους πόλους ΚΠ και τροφοδοτούμενο από το ρεύμα διέγερσης δημιουργεί το διάρρευμα Θ . Από το διάρρευμα Θ προέρχεται το μαγνητικό πεδίο \vec{B} , το οποίο απεικονίζεται με τις δυναμικές γραμμές. Οι γραμμές αυτές εξέρχονται από το βόρειο πόλο Ν και εισέρχονται στον νότιο πόλο S. Ο αριθμός των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων. Συνήθως οι κύριοι πόλοι κατασκευάζονται στενότεροι στο μέσο, για να εξοικονομήσουμε χώρο για το τύλιγμα διέγερσης, όπως βλέπουμε στο σχήμα (Α.3.4). Τότε ο πόλος αποτελείται από τον πυρήνα και το μέρος το οποίο βρίσκεται απέναντι από τον δρομέα και λέγεται πέλμα. Για μεγάλη ισχύ και χαμηλό αριθμό στροφών κατασκευάζουμε μηχανές με περισσότερους από τέσσερις πόλους φθάνοντας έως 24 πόλους.



Σχήμα Α.3.4: Πόλος με πυρήνα και πέλμα.

Ο αριθμός των πόλων, όπως θα δούμε παρακάτω, εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα και από την ισχύ, η οποία βασικά προκύπτει ως γινόμενο της ροπής επί την ταχύτητα. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε δεδομένη την ισχύ, την οποία πρέπει να μετατρέψει η μηχανή, τότε επιλέγοντας μικρότερη ταχύτητα πρέπει να μεγαλώσει ο αριθμός των πόλων για να έχουμε μεγαλύτερη ροπή.

Οι πόλοι δεν βρίσκονται υπό την επίδραση εναλλασσόμενης μαγνήτισης, επομένως μπορούν να κατασκευαστούν από μαζικό σίδηρο (χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας) επειδή δεν υπάρχουν δινορεύματα.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Ηλεκτρικές Μηχανές - Μέρος Α

- Α. Προβλήματα προς λύση
- Β. Υποδειγματικές λύσεις
- Γ. Υποδειγματικές ασκήσεις γραπτής εξέτασης

Α' Προβλήματα προς λύση

1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ (Μ.Τ.)

1.1. Μ.Τ. μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος

Δεδομένα:

Ονομαστική ισχύς $P_N = 5000 \text{ VA}$, απώλειες βραχυκυκλώματος υπό ονομαστικό ρεύμα $P_k = 500 \text{ W}$, σχετική τάση βραχυκύκλωσης $u_k = \sqrt{2} \cdot 10 [\%]$.

Ο Μ/Τ τροφοδοτείται στο πρωτεύον με ονομαστική τάση και φορτίζεται στο δευτερεύον με ονομαστικό ρεύμα. Υποθέτουμε ότι το ρεύμα μαγνήτισης είναι αμελητέο.

Ζητούμενα:

Να εξετασθούν τρία είδη φορτίου:

i) ωμικό, ii) επαγωγικό, iii) χωρητικό.

- Σε κάθε περίπτωση να βρεθεί η τάση του δευτερεύοντος (ανηγμένη στην ονομαστική της τιμή, δηλ. ποσοστό αυτής).
- Να βρεθεί η γωνία φάσεως μεταξύ ρεύματος και τάσης στο πρωτεύον (να διευκρινιστεί αν υπάρχει προπορεία ή επιπορεία).
- Να βρεθεί το εκάστοτε φορτίο $\frac{1}{\omega C}$ και ωL (αναγωγή στην $Z_{k2} \equiv$ αντίσταση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή).

1.2. Μ.Τ. Τριφασικού Ρεύματος

Δεδομένα:

$P_N = 250 \text{ kVA}$, $U_{1N} / U_{2N} = 20 \text{ kV} / 0,525 \text{ kV}$, $u_k = 4\%$, $f_N = 50 \text{ Hz}$,
απώλειες εν κενώ $P_0 = 670 \text{ W}$, απώλειες βραχυκύκλωσης $P_k = 4100 \text{ W}$.

Ζητούμενα:

- Να βρεθεί η τάση U_2 σε ονομαστική λειτουργία με βάση τον επιτρεπτό προσεγγιστικό τύπο, που χρησιμοποιείται όταν $u_k < 4\%$, θεωρώντας $\cos \varphi_{2N} = 0,8$.
- Να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία.
- Υπό ποία φόρτιση (I_2 / I_{2N}) έχει ο βαθμός απόδοσης του Μ.Τ. μέγιστη τιμή

Β' Υποδειγματικές λύσεις

1. Τριφασικός Μετασχηματιστής

Δεδομένα:

Τριφασικός μετασχηματιστής με τα παρακάτω στοιχεία:

$$P_N = 360 \text{ MVA}, U_{2N}/U_{2N} = 21.111 \text{ V}/380.000 \text{ V}, P_0 = 50 \text{ kW}, \cos\varphi_0 = 0,3,$$

$$P_K = 300 \text{ kW}, \cos\varphi_K = \frac{\sqrt{2}}{2}, Y_0, R'_2 = 2R_1, X'_{2\sigma} = 2X_{1\sigma}.$$

Ζητούμενα:

- Να υπολογισθεί το ρεύμα εν κενώ και τα στοιχεία R_F και L_h .
- Να υπολογισθούν τα στοιχεία $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, R_1, R_2$.
- Να υπολογισθεί η εκατοστιαία αλλαγή της τάσης, όταν το δευτερεύον φορτισθεί καθαρά χωρητικά και με ονομαστικό ρεύμα.
- Να υπολογισθεί η χωρητικότητα των πυκνωτών για αντιστάθμιση της αέργου ισχύος στην ονομαστική λειτουργία, αν $\cos\varphi_{1N} = 0,8$.

Λύση:

- Κατά την εν κενώ λειτουργία η ισχύς που καταναλώνεται δίνεται από τη σχέση:

$$P_0 = \sqrt{3} U_N I_0 \cdot \cos\varphi_0 \rightarrow I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_N \cos\varphi_0},$$

αντικαθιστούμε τις τιμές και υπολογίζουμε το I_0 :

$$I_0 = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 21.111 \cdot 0,3 \text{ V}} = 4,5 \text{ A}, \quad I_0 = 4,5 \text{ A}$$

Η ισχύς P_0 καταναλώνεται στην αντίσταση του σιδήρου R_{Fe} , συνεπώς:

$$\frac{P_0}{3} = \frac{\frac{U_1^2}{3}}{R_{Fe}} \rightarrow R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_0}$$

αντικαθιστούμε τα δεδομένα και παίρνουμε:

$$R_{Fe} = \frac{(21.111)^2}{50 \cdot 10^3} = 8.913,5 \, \Omega \text{ ανά φάση}, \quad R_{Fe} = 8,9155 \text{ k}\Omega.$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει:

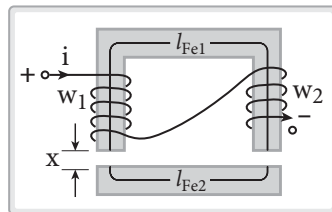
Γ'

Υπόδειγμα ασκήσεων γραπτής εξέτασης με χρήση βοηθημάτων

Άσκηση 1: Ηλεκτρομαγνητικές έννοιες Ηλεκτρικών Μηχανών

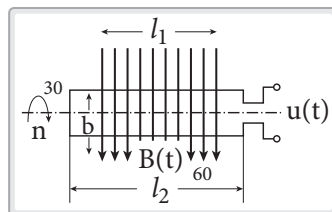
- α. $l_{Fe1} = 5 \cdot l_{Fe2} = 80 \text{ cm}$, $i = 100 \text{ A}$, $x = 2 \text{ mm}$,
 $w_1 = 500$, $\mu_{Fe} = 10^4$, $w_2 = 1.000$.

Να υπολογισθεί η ένταση του πεδίου στο σίδηρο και στο διάκενο.



- β. $n = 3.000 \text{ 1/min}$, $b = 30 \text{ cm}$, $l_1 = 40 \text{ cm}$,
 $l_2 = 60 \text{ cm}$, $B(t) = 10 \sin \omega t [\text{kG}]$.

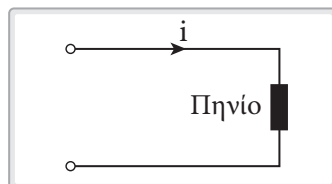
Να υπολογισθεί η τάση $u(t)$.



- γ. Ένα πηνίο τροφοδοτείται από ρεύμα και η σχέση ροής – ρεύματος ακολουθεί τον τύπο

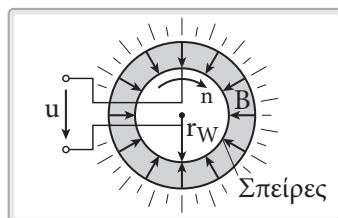
$$\Phi = \Phi_0(1 - e^{-ai}) \text{ με } \Phi_0 = 0,1 \text{ Vs}, a = 1/\text{A}.$$

Να βρεθεί η μαγνητική ενέργεια του πηνίου $W = f(i)$ και να σχεδιασθεί αυτή η σχέση.



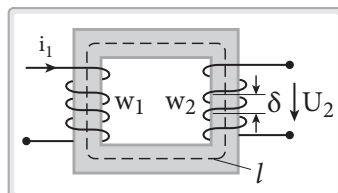
- δ. Μοντέλο μηχανής:

$B = 12 \text{ kGauss}$, $n = 1.500 \text{ 1/min}$, $r = 30 \text{ cm}$,
 $l = 100 \text{ cm}$ (μήκος κυλίνδρου). Πόσες σπείρες απαιτούνται για να προκύψει $u = 40 \text{ V}$;



- ε. Μοντέλο μετασχηματιστή:

$i_1 = 10 \sin \omega t [\text{A}]$, $f = 50 \text{ Hz}$, $w_1 = 500$, $w_2 = 50$,
 $l = 2 \text{ m}$, $\delta = 1 \text{ mm}$, $A = 120 \text{ cm}^2$, $\mu_r = 2 \cdot 10^3$,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ H/cm}$. Να βρεθεί η τάση $u_2(t)$.



ΜΕΡΟΣ

B

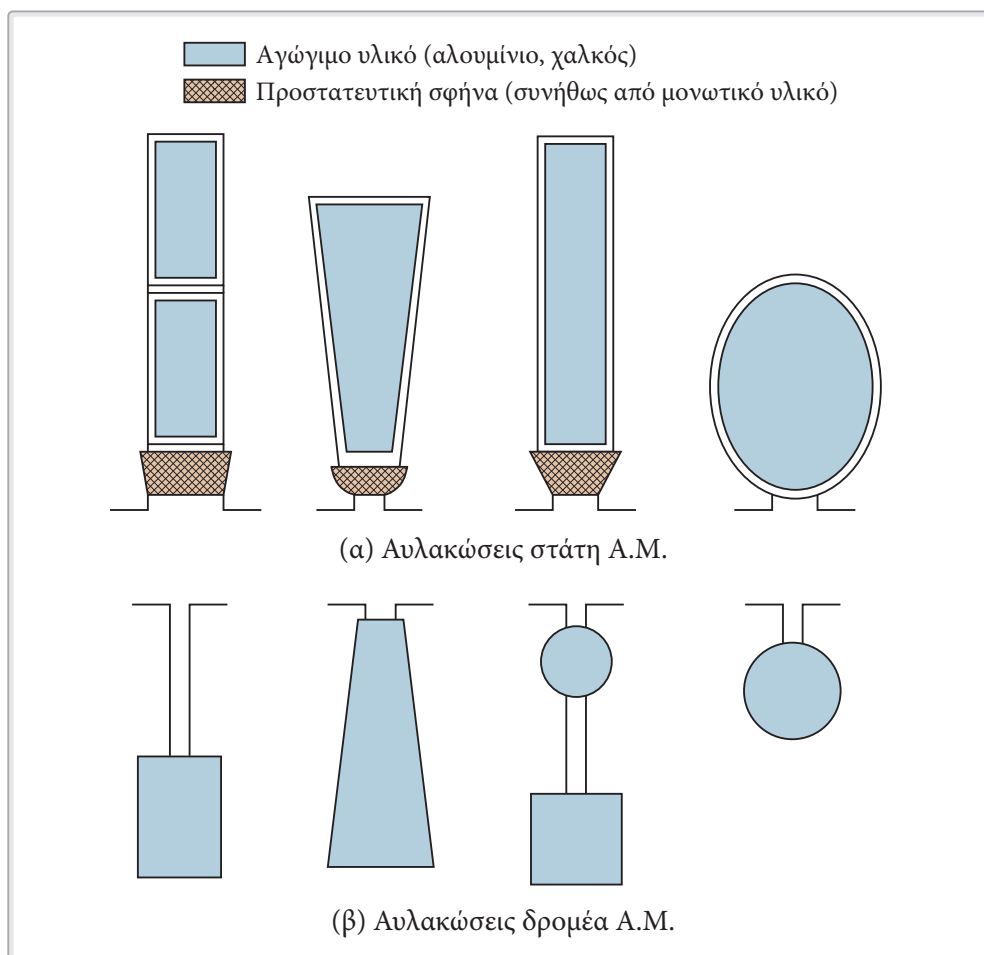
Ασύγχρονες Μηχανές
Σύγχρονες Μηχανές

Κεφάλαιο Β.1

Ασύγχρονες Μηχανές (Α.Μ.)

Β.1.1. Βασικές αρχές κατασκευής Α.Μ. [1, 2, 3, 4, 5, 21, 26, 51, 53, 54]

Μια ασύγχρονη μηχανή ονομάζεται και επαγωγική μηχανή. Αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος τον στάτη και από ένα περιστρεφόμενο τον δρομέα. Ο στάτης φέρει στο εσωτερικό του μέρος αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα μονοφασικό ή διφασικό ή τριφασικό τύλιγμα. Τούτο παίρνει ρεύμα από το δίκτυο και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει στον δρομέα ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά μαζί με το πεδίο που τα δημιούργησε προκαλούν δυνάμεις και κατά συνέπεια ηλεκτρομαγνητική ροπή, υπό την επίδραση δε αυτής ο δρομέας τίθεται σε περιστροφική κίνηση. Η κατασκευή της μηχανής πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το απαραίτητο ρεύμα, ή ακριβέστερα τα απαραίτητα «αμπερελίγματα» για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, να είναι όσο γίνεται πιο μικρό. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε, όταν το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα γίνει όσο το δυνατό μικρότερο. Τούτο είναι το κύριο μέτρο. Μπορούμε ακόμη να δώσουμε στις αυλακώσεις κατάλληλο σχήμα για να μικρύνουμε περισσότερο το αναγκαίο ρεύμα για τη δημιουργία του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου. Έτσι, στις μέχρι τώρα κατασκευές συναντάμε στον στάτη ως επί το πλείστον ανοιχτές κατά το ήμισυ. Στην καλλίτερη περίπτωση, οι αυλακώσεις πρέπει να είναι κλειστές, αλλά αυτό σημαίνει δύσκολη τοποθέτηση των ηλεκτρικών αγωγών εντός αυτών. Όσο μικραίνει το άνοιγμα μιας αυλάκωσης, τόσο μικρότερη γίνεται η σκέδαση και τόσο μεγαλύτερη ασφάλεια έχουμε έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων για τα τυλίγματα του δρομέα. Όσο μεγαλώνει το μέγεθος της μηχανής, τόσο προβληματικό γίνεται τούτο, διότι μεγαλώνουν οι δυσκολίες κατά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων και η μηχανή γίνεται αντισοικονομική. Στον στάτη συναντάμε κάποτε και ανοιχτές αυλακώσεις. Τούτο συμβαίνει όταν πρόκειται για μηχανές υψηλών τάσεων, οπότε τα τυλίγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση και συνεπώς πρέπει να προκατασκευαστούν και να

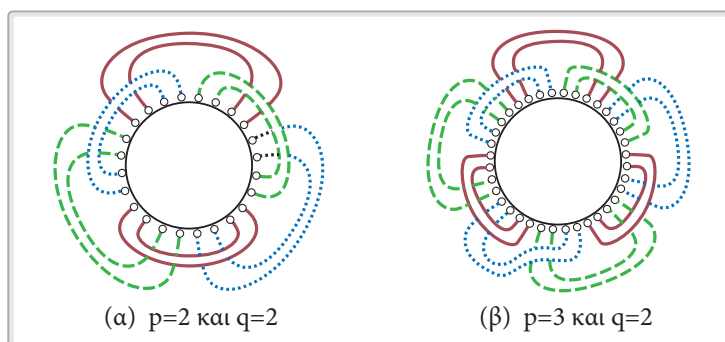


Σχήμα Β.1.1. Σχηματική παράσταση χαρακτηριστικών αυλακώσεων ασύγχρονων μηχανών.

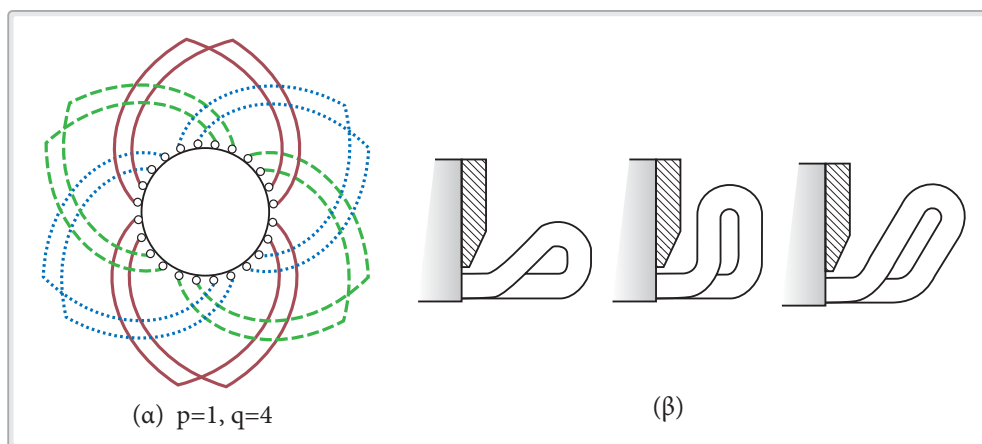
τοποθετηθούν έτοιμα μέσα στις αυλακώσεις. Στο σχήμα (Β.1.1) βλέπουμε μερικούς χαρακτηριστικούς τύπους αυλακώσεων στάτη και δρομέα. Στα συγγράμματα [1, 2, 4, 21, 26, 51] βρίσκει ο αναγνώστης εκτενέστερη περιγραφή για τη διαμόρφωση των αυλακώσεων.

Η περιέλιξη των τυλιγμάτων που τοποθετούνται στις αυλακώσεις γίνεται κατά τρεις τρόπους:

- α)** Η περιέλιξη γίνεται εκτός της μηχανής χρησιμοποιώντας ένα καλούπι. Το τυλιγμα αποκτά την τελική του μορφή και κατόπιν εισάγεται στις αυλακώσεις τοποθετώντας με το χέρι κάθε αγωγό. Οι αγωγοί έχουν κυκλική διατομή και διάμετρο μέχρι 2,5 mm.



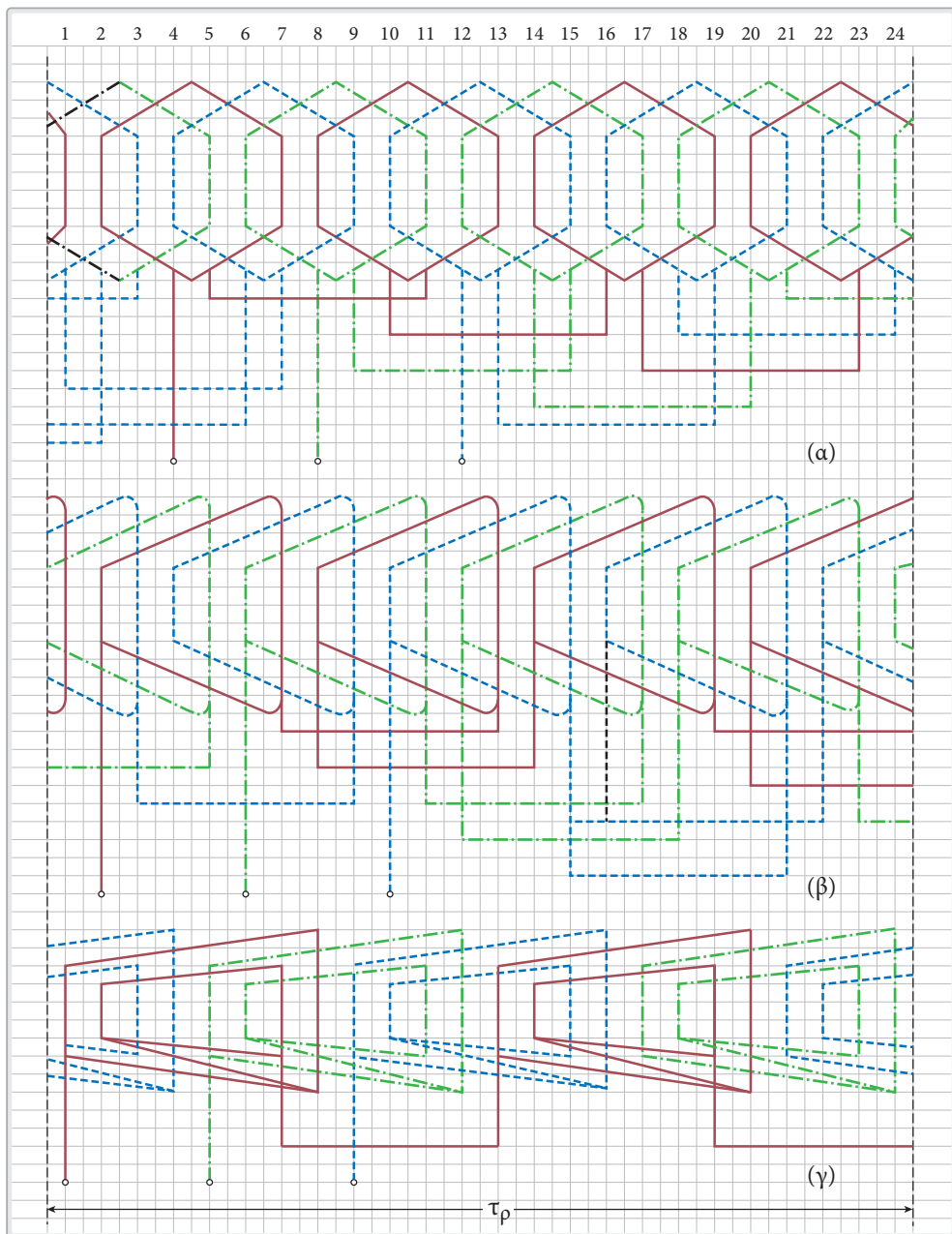
Σχήμα Β.1.8. Τυλίγματα δύο επιπέδων [3].



Σχήμα Β.1.9. Τυλίγματα με πηνία της ίδιας μορφής και του ίδιου πλάτους κατανομημένα ομοιόμορφα [3]
 α) συνδεσμολογία, β) μορφές κεφαλών.

Υπάρχουν τυλίγματα με q = ακέραιος και άλλα με q = κλασματικός. Στις σύγχρονες μηχανές συναντάμε τυλίγματα με κλασματικό q , διότι έτσι προκύπτει ευνοϊκότερη καμπύλη τάσης εξ επαγωγής, δηλαδή αυτή τείνει περισσότερο στην ημιτονοειδή μορφή.

Στο σχήμα (Β.1.10) παριστάνονται τα αναπτύγματα διαφόρων τυλιγμάτων τριφασικής μηχανής. Διακρίνουμε τυλίγματα με πηνία διαφορετικού πλάτους και άλλα πηνία του ίδιου πλάτους. Υπάρχουν τυλίγματα με ομοιόμορφη κατανομή των κεφαλών (σχήμα Β.10. α). Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι τα τυλίγματα της ασύγχρονης μηχανής, όπως και τα τυλίγματα κάθε ηλεκτρικής μηχανής αποτελούν ένα πολύ σημαντικό μέρος των μηχανών. Η γνώση σε βάθος και σε έκταση για τα τυλίγματα αντλείται από την πλούσια βιβλιογραφία περί τυλιγμάτων. Συνιστάται οι αναγνώστες να μελετήσουν ιδίως τις βιβλιογραφικές πηγές [1, 2, 3, 4, 5, 17, 51, 52, 53] και διάφορες πηγές από το διαδίκτυο.



Σχήμα Β.1.10. Σχηματική παράσταση αναπτύγματος και συνδεσμολογία τριφασικών τυλιγμάτων διαφόρων μορφών μιας τριφασικής ασύγχρονης μηχανής. Όλα τα τυλιγμάτα έχουν τις φάσεις τους συνδεδεμένες κατά αστέρα. α) Τύλιγμα του ίδιου πλάτους και ομοιόμορφης κατανομής των κεφαλών. β) Τύλιγμα τριών επιπέδων με πηνία ίδιου πλάτους. γ) Τύλιγμα τριών επιπέδων με πηνία διαφορετικού πλάτους. τ_p = πολική απόσταση.

Κεφάλαιο Β.2

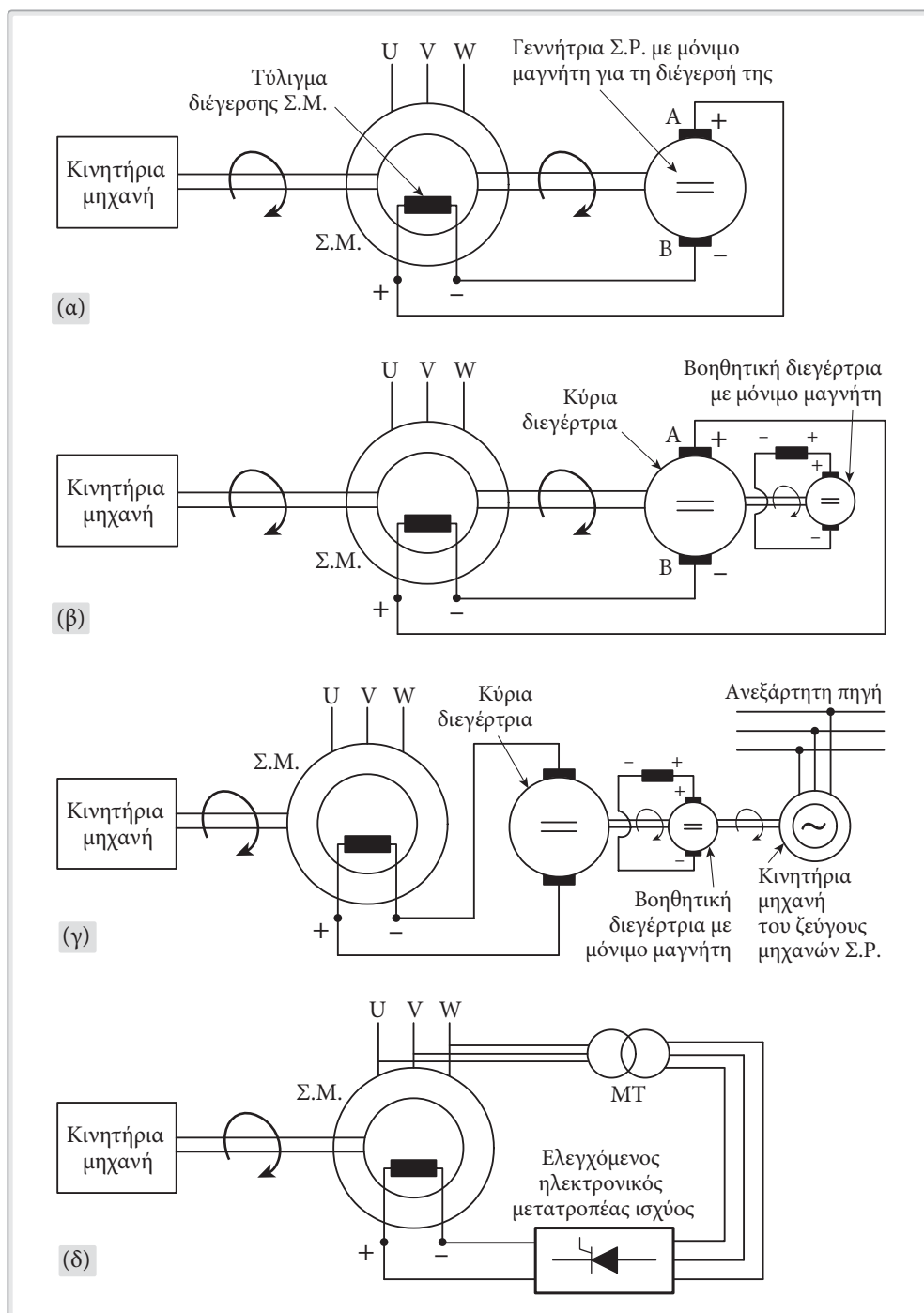
Σύγχρονες Μηχανές (Σ.Μ.)

Β.2.1 Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία

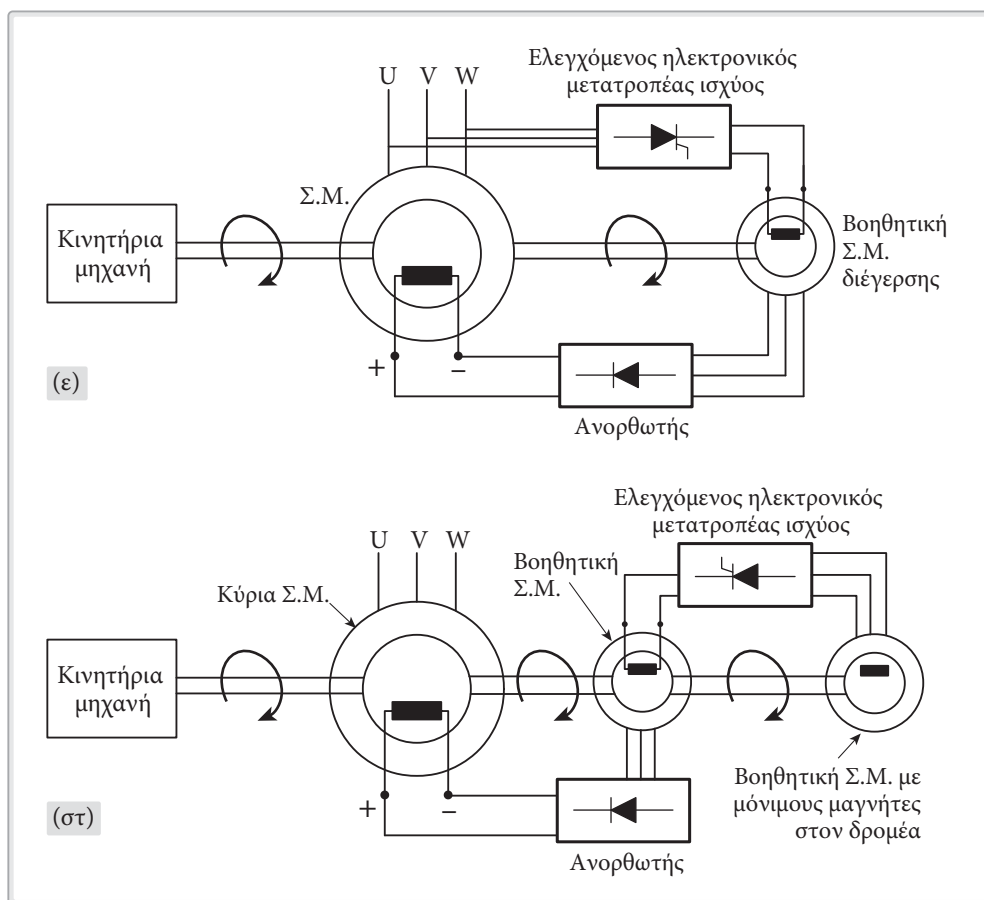
Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί το επίκεντρο κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 1887 οι ερευνητές Haselwander και Bradley ο καθένας ανεξάρτητα ανέπτυξαν για πρώτη φορά τριφασική σύγχρονη μηχανή, ενώ προηγουμένως υπήρχε η μονοφασική σύγχρονη γεννήτρια για παροχή ενέργειας για τις ανάγκες του φωτισμού. Στη συνέχεια ακολούθησε η εξέλιξη της σύγχρονης μηχανής επιτυγχάνοντας σπουδαίες καινοτομίες συμβαδίζοντας η ανάπτυξη της με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι γνωστό ότι η τριφασική σύγχρονη γεννήτρια κατέχει σχεδόν την αποκλειστικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το μέγεθος ισχύος μιας μονάδας μετατροπής ενέργειας από τη φυσική μορφή σε ηλεκτρική υπήρξε διαρκώς αυξανόμενο. Στην πορεία αυτής της εξέλιξης έπρεπε να αντιμετωπισθούν σημαντικά τεχνικά προβλήματα που συνεπάγεται η αύξηση των διαστάσεων μιας ηλεκτρικής μηχανής. Τα προβλήματα εμφανίζονται τόσο στον σχεδιασμό και στην κατασκευή στο εργοστάσιο, όσο και στη μεταφορά, του μηχανήματος μεγάλου βάρους, όπως και στην εγκατάσταση και λειτουργία στον τόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι αυτονόητο ότι η αύξηση του μεγέθους σε πολύ μεγάλη κλίμακα υποχρεωτικά συμβαδίζει με την αύξηση του μεγέθους των μηχανολογικών μηχανών, που είναι κατάλληλες να περιστρέφουν τον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας, δηλαδή κυρίως των ατμοστροβίλων και των υδροστροβίλων.

Επίσης, ο τριφασικός μετασχηματιστής που συνδέεται μεταξύ εξόδου της γεννήτριας και του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι του κατάλληλου μεγέθους. Ένα άλλο πρόβλημα καθοριστικής σημασίας είναι η ψύξη της σύγχρονης μηχανής λόγω των απωλειών ενέργειας σε θερμότητα που οφείλεται στις ωμικές αντιστάσεις και στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα.

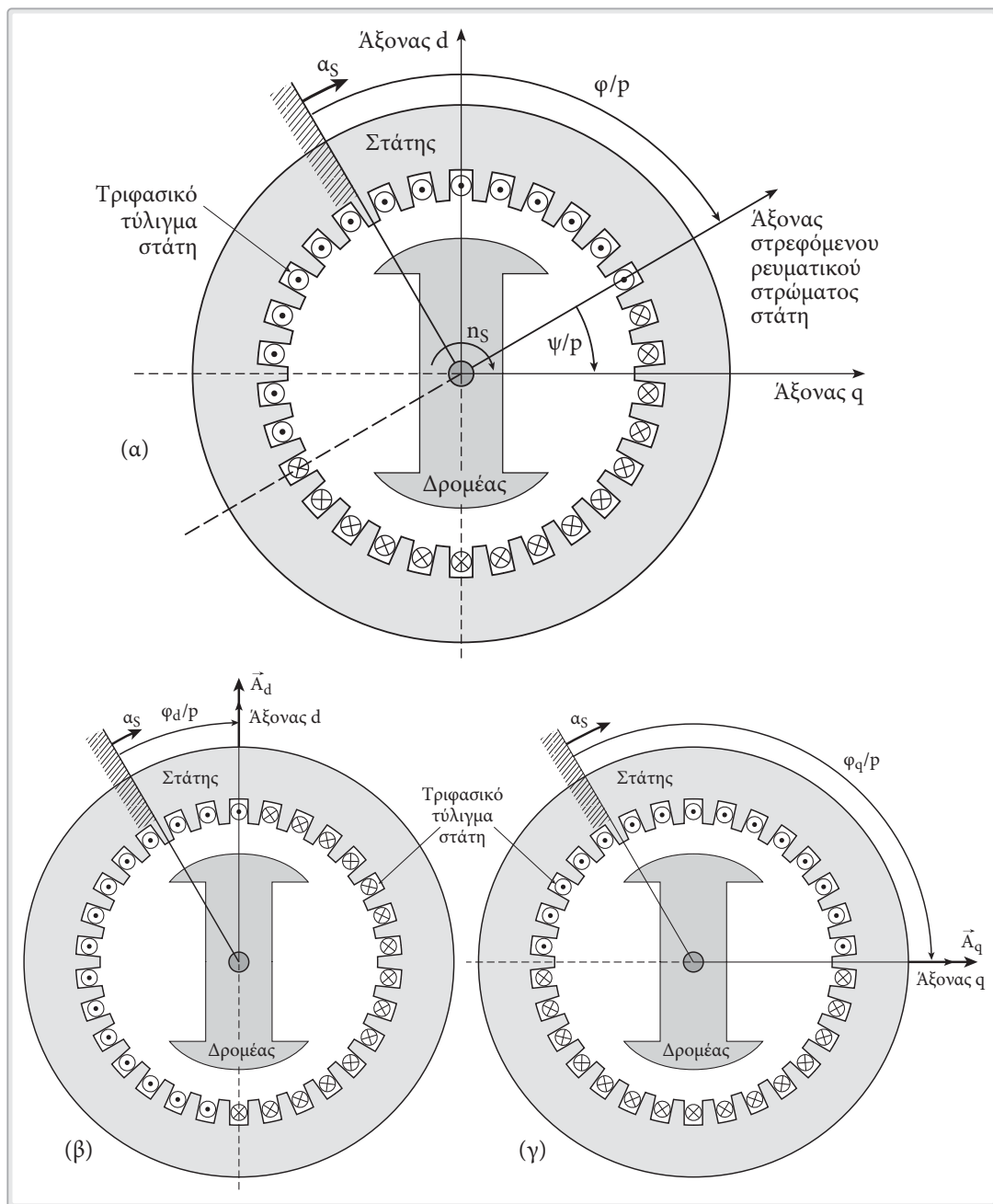


Σχήμα Β.2.9. Σχηματική παράσταση συστημάτων διέγερσης Σ.Μ.



Σχήμα Β.2.9. (συνέχεια)

Για την αποφυγή των ψηκτρών και των δακτυλίων ολίσθησης αναπτύχθηκε το σύστημα, που παρουσιάζεται στο σχήμα (Β.2.10). Αυτό το σύστημα διέγερσης επιλέγεται για Σ.Μ. πολύ μεγάλης ισχύος και είναι αποτέλεσμα νεώτερης εξέλιξης των συστημάτων διέγερσης των σύγχρονων μηχανών. Με τον άξονα της κινητήριας μηχανής συνδέεται μηχανικά μια βοηθητική Σ.Μ. με στατικό τύλιγμα διέγερσης, αλλά με στρεφόμενο τριφασικό τύλιγμα τυμπάνου. Με την ιδέα αυτή παράγεται τριφασική τάση εξ επαγωγής, η οποία στη συνέχεια ανορθώνεται μέσω μιας τριφασικής γέφυρας αποτελούμενης από διόδους. Αυτός ο μη ελεγχόμενος μετατροπέας περιστρέφεται μαζί με όλο το στρεφόμενο συγκρότημα και η ανορθωμένη τάση φθάνει στο τύλιγμα διέγερσης της κύριας Σ.Μ. εύκολα, χωρίς την παρεμβολή ψηκτρών και δακτυλίου ολίσθησης, αποφεύγοντας έτσι την αναγκαία τακτική επιθεώρηση αυτών των στοιχείων. Ο έλεγχος της τι-



Σχήμα Β.2.39. Σχηματική παράσταση του ρευματικού στρώματος του στάτη χωρίς ρεύμα διέγερσης στον δρομέα σε κάποια χρονική στιγμή ($t=0$). α) Στρεφόμενο ρευματικό στρώμα του στάτη \vec{A}_s . β) Συνιστώσα του ρευματικού στρώματος του στάτη στον άξονα d \vec{A}_d . γ) Συνιστώσα του ρευματικού στρώματος του στάτη στον άξονα q \vec{A}_q .

Κεφάλαιο Β.3

Μονοφασικές Μηχανές

Β.3.1. Μονοφασική σύγχρονη μηχανή

Η μονοφασική σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιείται κυρίως ως γεννήτρια σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, από τα οποία παίρνουν ηλεκτρική ενέργεια οι ηλεκτρικοί σιδηροδρομικοί συρμοί. Η συχνότητα αυτών των δικτύων είναι 16 2/3 Hz ή 25 Hz και τροφοδοτούν τους ειδικούς κινητήρες των ηλεκτρικών τραίνων [1, 2, 4, 6, 12].

Η κατασκευή είναι κατά βάση η ίδια όπως και της τριφασικής σύγχρονης μηχανής. Στον στάτη μένει το 1/3 της περιφέρειας ακάλυπτο, διότι λείπει η τρίτη φάση, ενώ οι άλλες δύο φάσεις συνδέονται σε σειρά. Ο δρομέας φέρει συνήθως έκτυπους πόλους και είναι εφοδιασμένος με κλωβό απόσβεσης.

Ο δρομέας δημιουργεί στον στάτη μια εναλλασσόμενη επαγωγική τάση, η οποία προκαλεί ένα μονοφασικό ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο αυτού του ρεύματος δεν είναι στρεφόμενο, όπως συμβαίνει στις τριφασικές σύγχρονες μηχανές, αλλά είναι στάσιμο στο χώρο και εναλλασσόμενο στο χρόνο. Για να αντιληφθούμε τις επιδράσεις αυτού του πεδίου, το αναλύουμε σε δύο στρεφόμενα πεδία, τα οποία στρέφονται σε αντίθετη κατεύθυνση. Εκείνη η συνιστώσα που στρέφεται με την ίδια φορά όπως και ο δρομέας προκαλεί τα ίδια αποτελέσματα, όπως συμβαίνει σε μία κανονική τριφασική μηχανή. Το πεδίο της αντίθετης φοράς ως προς τον δρομέα στρέφεται με τη διπλάσια σύγχρονη ταχύτητα και δημιουργεί στο τύλιγμα διέγερσης ισχυρά ρεύματα, εάν δεν υπάρχει τύλιγμα απόσβεσης. Τα ηλεκτρικά μεγέθη που προέρχονται από αυτό το πεδίο έχουν διπλάσια συχνότητα. Το ρεύμα που επάγεται στο τύλιγμα διέγερσης δημιουργεί ένα πεδίο διπλάσιας συχνότητας, το οποίο επίσης αναλύουμε σε δύο αντίθετα στρεφόμενες συνιστώσες. Η συνιστώσα που στρέφεται με την ίδια φορά που έχει ο δρομέας επάγει στον στάτη τάσεις τριπλάσιας συχνότητας, ενώ η συνιστώσα με αντίστροφη φορά επάγει τάσεις με κανονική συχνότητα. Το ρεύμα του στάτη με τριπλάσια συχνότητα επάγει στο τύ-

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Ηλεκτρικές Μηχανές - Μέρος Β

- A. Προβλήματα προς λύση
- B. Υποδειγματικές λύσεις

Α' Προβλήματα προς λύση

1. ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ (Α.Μ.)

1.1. Μελέτη λειτουργικής συμπεριφοράς μίας Α.Μ.

Δεδομένα:

Ένας ασύγχρονος κινητήρας έχει τα ακόλουθα στοιχεία:

Ονομαστική ισχύς $P = 11 \text{ kW}$, ονομαστική τάση $U_N = 380 \text{ V}$, ονομαστικό ρεύμα $I_N = 23 \text{ A}$, ονομαστικός αριθμός στροφών $n_N = 1.435 \text{ 1/min}$, λόγος ροπής εκκίνησης προς ονομαστική ροπή $M_a/M_N = 2$, ροπή αδρανείας $J = 0,068 \text{ Nmsec}^2$ (δρομέας), διάμετρος δρομέα $D_R = 14,6 \text{ cm}$.

Ζητούμενα:

- Να βρεθεί ο χρόνος που απαιτείται για την κίνηση της μηχανής από την ηρεμία έως τον ονομαστικό αριθμό στροφών χωρίς φορτίο με M_a σταθερό (ροπή εκκίνησης).
- Πόσες περιστροφές εκτελεί ο δρομέας κατά την προηγούμενη εκκίνηση;
- Ποια ταχύτητα έχει το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο;
- Πόση είναι η ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα κατά την εκκίνηση;
- Πόση ενέργεια έχει απορροφηθεί από το δίκτυο κατά την εκκίνηση;

1.2. Προσδιορισμός ροπής εκκίνησης μίας Α.Μ.

Δεδομένα:

Ένας ασύγχρονος κινητήρας με 4 πόλους συνδέεται σε δίκτυο συχνότητας 50 Hz και τάσης 380 V . Όταν ο δρομέας παραμένει ακίνητος, το ρεύμα του στάτη είναι 32 A και ο συντελεστής ισχύος $\cos\varphi = 0,288$. Η αντίσταση του στάτη είναι $1,4 \Omega$ μεταξύ δύο πόλων, όταν οι φάσεις είναι συνδεδεμένες κατά αστέρα.

Ζητούμενα:

Να βρεθεί η ροπή κατά την εκκίνηση, όταν ο ίδιος ο κινητήρας συνδεθεί σε δίκτυο 3.000 V . Οι απώλειες σιδήρου παραλείπονται.

Β' Υποδειγματικές λύσεις

1. Μελέτη της λειτουργίας μίας Α.Μ.

Δεδομένα:

$P_N = 100 \text{ kW}$, $U_N = 6 \text{ kV}$, $\cos\varphi_N = 0,86$, $\eta_N = 0,85$, $n_N = 980 \text{ 1/min}$, $f = 50 \text{ Hz}$, Υγ.

Ζητούμενα:

- Πόση πρέπει να είναι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή σε τριφασική συνδεσμολογία Υ, ώστε η μηχανή να παίρνει από το δίκτυο μόνο την ονομαστική ενεργό ισχύ;
- Πόση είναι η ροπή ανατροπής εάν $s_K = 10\%$;
- Εάν $R_S = 0,15 \Omega$ και $P_{Fe} = P_{CuS}$, να υπολογισθούν P_δ , M_e , P_m και P_{CuR} στην ονομαστική κατάσταση (M_e , P_m είναι εσωτερικά μεγέθη).
- Εάν θεωρήσουμε το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο σταθερό και ίσο με το πεδίο που έχουμε στην εν κενώ κατάσταση, να βρεθεί μία σχέση μεταξύ I_R και ω_R στον δρομέα, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα.
- Εάν ρυθμίζουμε την ταχύτητα διά μεταβολής της συχνότητας f_s του στάτη, πώς μπορούμε να διατηρούμε το μαγνητικό πεδίο σταθερό;
- Δύο Α.Μ. έχουν, η μία $\delta = 1 \text{ mm}$ και μισόκλειστες αυλακώσεις ενώ η άλλη $\delta = 2 \text{ mm}$ και ανοικτές αυλακώσεις. Ποια θεωρείται πλεονεκτικότερη και γιατί;

Λύση:

$$\alpha. \quad P_{\epsilon v N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{100 \text{ kW}}{0,85} = 117,65 \text{ kW},$$

$$\begin{aligned} \tan\varphi_N &= \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi_N}}{\cos\varphi_N} = \frac{\sqrt{1 - (0,86)^2}}{0,86} = \frac{\sqrt{1 - 0,7396}}{0,86} = \\ &= \frac{\sqrt{0,2604}}{0,86} = \frac{0,51}{0,86} = 0,593, \end{aligned}$$

$$P_{\alpha \epsilon p N} = 117,65 \text{ kVA} \cdot 0,593 = 69,766 \text{ kVA}.$$

Οι πυκνωτές πρέπει να προσφέρουν την άεργο ισχύ:

$$P_{\alpha\epsilon\rho N} = 3 \frac{U_N^2}{\frac{1}{\omega} C} = 3 U_{\varphi N} \omega C = \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2 \omega C,$$

Από τη συνθήκη αυτή προκύπτει:

$$C = \frac{P_{\alpha\epsilon\rho N}}{U_N^2 \omega} = \frac{69.776}{6.000^2 \cdot 2\pi 50} \text{ F} = \frac{69.776}{36 \cdot \pi \cdot 10^8} \text{ F} \Rightarrow C = 6,16 \mu\text{F}.$$

β. Από τον προσεγγιστικό τύπο του Kloss παίρνουμε:

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}} \Rightarrow M_K = M_N \cdot \frac{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}}{2},$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \Omega_N} = \frac{100 \text{ kW s}}{2\pi \frac{980}{60}} = \frac{300}{\pi 98} \text{ kW s} = 0,974 \text{ kW s},$$

$$s_N = \frac{100 - 980}{1000} = \frac{2}{1000} = 0,02,$$

$$M_K = M_N \cdot \frac{\frac{0,1}{0,02} + \frac{0,02}{0,1}}{2} = M_N \cdot \frac{5 + 0,002}{2} = 2,501 M_N = 2,435 \text{ kW s}.$$

γ. $P_{\delta N} = P_{\epsilon v N} - 3 R_S I_N^2 - P_{Fe} = P_{\epsilon v N} - 6 R_S I_N^2.$

Η σχέση αυτή ισχύει, διότι η ισχύς P_{δ} του διακένου είναι ενεργός ισχύς και επιπλέον δίνεται η σχέση $P_{CuS} = 3 R_S I_N^2 = P_{Fe}.$

Το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\epsilon v N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \Rightarrow$$

$$I_N = \frac{P_N}{\eta_N \sqrt{3} U_N \cos \varphi_N} = \frac{100 \text{ kW}}{0,85 \sqrt{3} 6 \text{ kV} 0,86} = 13,18 \text{ A}.$$

$$P_{\delta N} = 117,65 \text{ kW} - 6 \cdot 0,15 \cdot (13,18)^2 \Omega \text{ A}^2 = (117,65 - 0,156) \text{ kW} \Rightarrow$$

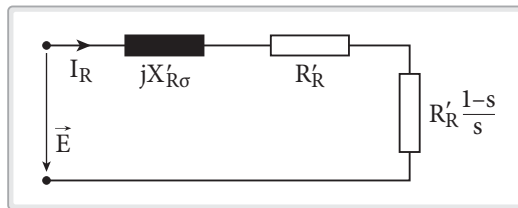
$$P_{\delta N} = 117,5 \text{ kW} \quad (P_{\delta N} \approx P_{\epsilon v N}).$$

$$M_{eN} = \frac{P_{\delta N}}{\Omega_S} = \frac{117,5 \text{ kW s}}{2\pi \frac{1000}{60}} = \frac{3 \cdot 117,5}{\pi \cdot 100} \text{ kW s} = 1,12 \text{ kW s},$$

$$P_{\text{mechN}} = P_{\delta N}(1-s_N) = 117,5 \cdot (1-0,02) \text{ kW} = 115,15 \text{ kW},$$

$$P_{\text{CuRN}} = P_{\delta N}s_N = 117,5 \cdot 0,02 \text{ kW} = 2,35 \text{ kW}.$$

- γ. Σταθερό πεδίο στο διάκενο σημαίνει σταθερή τάση εξ επαγωγής στον δρομέα. Επομένως ισχύει:



$$\vec{I}_R = \frac{\vec{E}}{jX'_{R\sigma} + R'_R/s} = \frac{s\vec{E}}{jsX'_{R\sigma} + R'_R} = \frac{\omega_S^R \vec{E}}{j\omega_R^R X'_{R\sigma} + R'_R}$$

$$\vec{I}_R = \frac{\omega_R \vec{E}}{j\omega_R X'_{R\sigma} + \omega_S R'_R}, \quad I_R = \frac{\omega_R \vec{E}}{\sqrt{(\omega_S R'_R)^2 + (\omega_R X'_{R\sigma})^2}}$$

- δ. Πια να διατηρήσουμε το μαγνητικό πεδίο σταθερό, όταν μεταβάλλεται η συχνότητα του στάτη, πρέπει να μεταβάλλουμε την τάση του στάτη. Αυτό είναι αναγκαίο διότι μεταβαλλόμενης της συχνότητας μεταβάλλεται κάθε επαγωγική αντίσταση π.χ. εν κενώ $\vec{Z}_S = R_S + j\omega_S L_S$. Έτσι όταν μικραίνει η ω_S , το ρεύμα μεγαλώνει για σταθερή U_S και προκαλεί βλάβη στα τυλίγματα. Πρέπει λοιπόν να διατηρούμε τον λόγο $\lambda = U_S/\omega_S$ σταθερό.
- ε. Πια να γίνει μία τέτοια σύγκριση πρέπει να υποθέσουμε ότι οι δύο μηχανές είναι καθ' όλα ίδιες πλην του διακένου δ και της μορφής των αυλακώσεων. Η μηχανή με $\delta = 1 \text{ mm}$ και μισόκλειστες αυλακώσεις μπορούμε να πούμε ότι είναι καλύτερη, διότι έχει *μικρότερη σκέδαση* σε σύγκριση με τη μηχανή που έχει $\delta = 2 \text{ mm}$ και ανοικτές αυλακώσεις.

Ευρετήριο όρων

- αεργος ισχύς, 11, 12, 14, 249, 250, 258, 264, 337, 350, 383, 405
αεργος συνιστώσα, 249, 385
αλληλεπαγωγιμότητα, 34, 335, 370, 393, 415
αντίδραση τυμπάνου, 191, 388, 458
 » εκκίνησης, 234, 235, 251
 » , μιγαδική 8, 9
αντιστροφή του ρεύματος, 159, 197
 » του ρεύματος τυμπάνου, 97, 197
ανώτερες αρμονικές, 6, 77, 105, 111-113, 271, 289, 291, 327, 341-346, 364, 413, 414, 464, 496
αποσυγχρονισμός, 364
απώλειες δινορευμάτων, 50, 53, 351
 » εν κενώ, 86
 » υπό φορτίο, 86
 » υστέρησης, 50-54, 76, 261
αυλακώσεις ανά πόλο και ανά φάση, 274
αυλακώσεων ασύγχρονων μηχανών, 270, 271, 289-293, 333, 336-339, 347
αριστερόστροφο σύστημα, 106-108
ασύγχρονες ανώτερες ροπές, 343
ασύγχρονη μηχανή, 42, 60, 269, 283-285, 299, 301, 315, 325, 326, 370, 378, 402, 426, 458, 465-469, 471
ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα, 271, 272, 318, 332, 334, 335, 336, 484
ασύγχρονη μηχανή με κλωβό, 271, 336, 338, 352
αυτεπαγωγιμότητα, 32-35, 47, 73-75, 200, 236, 248, 249, 377, 494

βάση στήριξης, 353
βασική αρμονική, 111, 112, 289, 291, 293, 324, 334, 335, 340, 341, 368, 412, 413
βατόμετρο, 11, 86, 418
βοηθητική μηχανή, 366, 456
βρόχος υστέρησης, 50, 53

γαλβανική ζεύξη, 297

γεννήτρια, 44, 105, 112, 152, 175, 176, 181, 190-194, 207, 210-214, 217-227, 232, 254, 255, 265, 283, 294, 307, 349, 350, 351, 356, 373, 377-388, 418, 455, 456, 463, 487, 489
γεννήτρια Σ.Ρ. διπλής διέγερσης, 217
 » » ξένης διέγερσης, 210
 » » με διέγερση σε σειρά, 216
 » » παράλληλης διέγερσης, 211
γεννήτρια, σύγχρονη, 61, 349, 350, 356, 359, 393, 396, 456
γεωμετρικός τύπος του ρεύματος, 86, 327, 434, 435, 436, 487
γεωμετρικός τύπος των ρευμάτων Α.Μ., 327
 » » ενεργού ισχύος, 388
 » » άεργου ισχύος, 388
γωνιακή ταχύτητα, 146, 178, 230, 233, 288, 293, 299, 303, 343, 369, 378, 500
γωνία φορτίου ή γωνία ισχύος, 377

δεξιόστροφο πεδίο, 465, 466
δεξιόστροφο σύστημα, 106, 107, 108
δημιουργία τάσης, 75, 174
διάγραμμα Ossana, 330
 » Sankey, 302, 309
διανυσματικό διάγραμμα, 9, 10, 76-83, 247, 249, 256, 333, 367, 373, 383-396, 403, 405, 411, 415-423, 488, 490, 495, 500, 502
διανυσματικό διάγραμμα Σ.Μ., 417
διάρρευμα, 30, 49, 79, 104, 109, 122, 123, 146, 176, 185-196, 208, 285, 398, 458
διάρρευμα, εγκάρσιο, 189
διαρροή, 176, 184, 187, 191, 265
διαφορά φάσης, 3, 9, 15, 17, 65, 77, 101, 114, 250, 292, 297, 301, 309, 333-336, 340, 348, 385, 388, 416, 417, 448-452, 470, 471, 474, 486
διέγερση Σ.Μ., 359-363
δυναμικές γραμμές, 25-27, 37, 42, 48, 56, 121, 146, 153, 155, 173, 179, 187, 460

- εκατοστιαία πτώση τάσης, 84
 εκκίνηση ασύγχρονης μηχανής, 313-321, 323
 εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος, 234-236
 εκκίνηση μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων, 469
 εκκίνηση σύγχρονης μηχανής, 381, 455, 456
 έκτυποι πόλοι, 351-356, 378, 398, 406-408, 412-438, 441, 458, 463, 490, 497, 498-500
 εναλλασσόμενη τάση, 4, 47, 141, 143, 153-155, 230, 324, 359
 εναλλασσόμενο ρεύμα, 3
 » » , συντελεστής εύρους, 5
 » » , συντελεστής μορφής, 5
 » » , μιγαδική παράσταση, 6
 ενεργός ισχύς, 11-14, 87, 109, 301, 303, 331, 377, 380, 385, 388, 404, 405, 425, 439, 492
 ενεργός ισχύς του διακένου, 303
 ενεργός συνιστώσα, 384, 388
 εξωτερική αντίσταση, 41, 216, 223, 225, 233-236, 299, 313, 314, 337
 επαγωγή, 27
 επαγωγική αντίσταση, 47, 247, 257, 326, 381, 382, 392-400, 419, 422, 428, 430, 431, 493
 επαγωγική αντίσταση, υπομεταβατική, 430
 επαγωγική μηχανή, 269
 επαγωγιμότητα, 31, 32, 46, 78, 124, 125, 392, 412
 επαγωγιμότητα, αμοιβαία, 33, 73
 επαγωγιμότητα, κύρια, 57, 76, 299, 335, 370, 391, 393, 413, 431, 467
 επαγωγιμότητα σκέδασης, 57, 81, 121, 125, 130, 335, 337, 371, 429, 430
 επαγωγιμότητα σκέδασης, ολική, 121
 επαγωγιμότητα, σύγχρονη, 372
 ευθύγραμμη αναστροφή, 201
- ηλεκτρική γωνία, 408
 ηλεκτρικό δυναμικό, 24
 ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, 45, 394, 399, 427
 ηλεκτρομαγνητική ροπή, 173, 219-222, 269, 271, 282-285, 295, 299-306, 311-314, 320, 338, 343, 344, 367, 375-377, 380, 424, 425, 437-444, 452, 458, 464, 469, 488, 501
 ηλεκτρομαγνητική ροπή Σ.Μ., 373, 424
 ηλεκτρομηχανικό σύστημα, 227, 441, 443, 451
- ιδανική κατάσταση, 283
 ιδιοϊσχύς, 94
 ιδιοσυχνότητα, 119, 346, 445-455
 ισοδυναμικές συνδέσεις, 169, 172, 173
 ισοδύναμο κύκλωμα, 73-76, 79, 81, 83, 98, 125-132, 246-248, 257, 297-302, 309, 326, 367, 372, 382, 389, 395, 403, 422, 466-469, 494
 ισοδύναμο κύκλωμα ζεύξης, 73
 ισοδύναμο κύκλωμα σκέδασης, 73, 75
 ισχύς διακένου ή εσωτερική ισχύς, 301
 » διέγερσης, 94, 254, 359, 360
 ισχύς μονοφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, 10
 ισχύς στρεφόμενου πεδίου, 301
- καμπύλη διέγερσης πεδίου, 285, 287
 » πεδίου, 285, 288, 289, 292, 335
 » υστέρησης, 28
 » χαρακτηριστική φορτίου, 185
 » εξωτερική χαρακτηριστική, 210
 κανόνας L' Hospital, 202
 » Lenz, 444
 κατανεμημένοι πόλοι, 351, 363, 364, 372, 373, 375, 408, 422, 433, 488, 489, 499
 κατανομή της ισχύος, 88, 309, 326
 » της μαγνητικής έντασης, 127
 κατανομή του μαγνητικού πεδίου, 55, 121, 127, 352
 κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, 143, 151, 239, 256
 κατάσταση υπερδιέγερσης, 382, 384, 418
 » υποδιέγερσης, 382, 384
 κεφαλές τυλίγματος, 174, 274
 κλωβός απόσβεσης, 354, 367, 430, 432, 433, 444, 463, 464
 κυκλικός σπινθηρισμός, 191
 κύκλος Heyland – Ossana, 329
 κύκλος διακένου, 288
 κυματομορφή, ημιτονοειδής, 3
 » , ορθογώνιος, 3
 » , πριονωτή, 3
- μαγνητική αγωγιμότητα, 31, 33, 204
 μαγνητική αντίσταση, 31, 41, 65, 189, 196, 271, 408
 μαγνητική ασυμμετρία, 112, 425

- μαγνητική διαπερατότητα, 28, 34, 35, 47, 49, 55, 72, 107, 122, 196, 265, 287, 392, 393
- μαγνητική ενέργεια, 34, 35, 44-47, 50-52, 367
- μαγνητική ζεύξη, 50, 56, 73, 121, 126, 297
- μαγνητική ροή, 3-6, 27, 30-38, 46-49, 56, 60-65, 76, 79, 86, 91, 104, 113, 123, 131, 158, 174, 175, 178, 184, 187, 193, 196, 213, 217, 220, 221, 234, 259, 296, 366, 371, 398, 444, 459, 486
- μαγνητική ροή, εναλλασσόμενη 366, 459
- μαγνητική τάση, 28, 29
- » » περιφοράς, 29
- μαγνητικές γραμμές, 41, 104, 153, 289, 294, 407
- μαγνητικό πεδίο, 22, 27, 271
- μαγνητικό πεδίο, αριστερόστροφο, 434, 465, 467
- μαγνητικό πεδίο ασύγχρονης μηχανής, 271, 284
- μαγνητικό πεδίο, δεξιόστροφο, 467, 469
- » » , θεμελιώδεις έννοιες, 27
- » » σκέδασης, 337
- μαγνητικό πεδίο στάτη, 272, 370, 374, 408, 412, 455, 467
- μαγνητικό πεδίο, στρεφόμενο 281-284, 292
- μαγνητικό πεδίο σύγχρονης μηχανής, 350-354
- μαγνητικό πεδίο συμμετρικής ασύγχρονης μηχανής, 339
- μαγνητικό πεδίο σύγχρονης μηχανής, 359, 363
- μέγιστη τάση εξ επαγωγής, 158
- μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών, 106
- » του ισολογισμού ισχύος, 424
- μερικό βήμα, 159
- μεταβατικές καταστάσεις, 304, 359, 431
- μεταβατικό φαινόμενο, 46, 113, 234, 236, 316, 394, 430
- μεταβολή της τάσης, 83, 84, 125
- μετασχηματιστής, 58, 61
- » μέγιστης ισχύος, 138
- » μέσης τάσης, 140
- μετασχηματιστής μέτρησης υψηλών τάσεων ή υψηλών ρευμάτων, 143
- μετασχηματιστής ρεύματος, 97
- μετασχηματιστής, τριφασικός, 87, 99, 112, 249, 250, 256, 264, 349
- μετασχηματιστής, μονοφασικός, 99, 111, 131
- μετασχηματιστής χαμηλής τάσης και χαμηλής ισχύος, 141
- μηδενικό σύστημα, 106, 109, 113
- μηχανές εξωτερικών πόλων, 458
- μηχανική φόρτιση, 181, 372, 379
- μιγαδικό εύρος ρεύματος, 7
- » » τάσης, 6
- νόμος της επαγωγής, 36, 37, 42, 53, 296
- » του Ohm, 26, 31
- » του διαρρέυματος, 30-36, 51, 94, 104, 109, 122, 183, 287
- » των ίσων επιφανειών, 441
- » του Montsinger, 134
- » του Stokes, 36
- ολίσθηση, 283, 284, 294-302, 307, 309-317, 326, 327, 331, 337, 342, 444, 465-468, 486, 500
- » ανατροπής, 283, 307, 314
- ονομαστικά μεγέθη, 17, 18, 252
- ονομαστική κατάσταση λειτουργίας, 17
- » τιμή, 17, 80, 93, 95, 314, 319, 320, 323, 377, 394, 499
- παραγωγή άεργου ισχύος, 456
- » ηλεκτρικής ενέργειας, 15, 138, 349, 447, 458
- » μηχανικού έργου, 51
- » συνεχούς τάσης, 153, 154, 360
- πεδίο σκέδασης, 57, 104, 118, 125-128, 187, 200, 206, 327, 337, 370, 392, 402, 433, 459, 460
- περιοχή ευστάθειας, 283, 315, 376, 388, 438
- » πέδης, 284
- περιστροφή, ασύγχρονη, 283
- πηνίο, 32
- πολική γωνία, 372, 377-380, 383, 421, 425, 434, 437, 438, 440, 442, 445, 488, 490, 500
- πολική τάση, 103, 104, 140, 319, 372, 382, 415
- πολικό βήμα, 158, 164, 170, 189, 208
- πόλος, θετικός και αρνητικός, 155
- πτώση τάσης εξ επαγωγής, 193
- πυκνότητα της μαγνητικής ενέργειας, 34, 35, 50, 52
- πυρήνας μετασχηματιστή, 62, 68, 119
- » δρομέα Σ.Μ., 351
- » στάτη Σ.Μ., 459
- ρεύμα βραχυκυκλώματος, κρουστικό, 394, 399, 429
- ρεύμα βραχυκυκλώματος, μόνιμο, 394-398, 426, 428

- ρεύμα διέγερσης, 65, 146, 147, 185, 187, 211-215, 224, 255, 359, 360, 366, 369, 375, 381-390, 394, 397, 402, 409, 435, 488, 498, 500, 504
- ρεύμα μαγνήτισης, 65, 77, 79, 83, 98, 111-114, 121, 127, 130, 131, 245, 271, 305, 311, 350, 388-391, 398, 402, 416, 417, 484
- ρευματικό στρώμα, 173, 176, 177, 183, 187-193, 205-207, 265, 285-294, 334, 335, 342, 368, 408-413, 455
- ροή σκεδάσεως, 55-58, 73, 75, 79, 128
- ροπή ανατροπής, 283, 307, 381, 426, 458, 469, 473, 491, 494, 496
- ροπή αντίδρασης, 425
- » , ταλαντευόμενη, 344, 455
- σημείο ανατροπής, 283, 315
- σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, 54
- » κλίσεως, 336
- » δύο τυλιγμάτων, 56
- στάσιμο κύμα, 291
- στάτης Α.Μ., 269
- » Σ.Μ., 145
- στατική ευστάθεια, 439
- » ροπή συγχρονισμού, 438, 443, 450
- σύγχρονη ανώτερη ροπή, 344
- » επαγωγιμότητα, 372
- σύγχρονη μηχανή, 42, 285, 344, 349, 351, 371, 380, 381, 388, 399, 402, 403, 417, 422, 426, 428, 437, 439, 441, 445, 455, 456, 463
- σύγχρονη μηχανή, βοηθητική, 360, 362
- σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους, 352-355, 398, 406, 412-436, 441, 458, 490, 497-500
- σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα, 358, 365, 367, 368, 372, 373, 382, 386, 395, 398-406, 414, 415, 422-426, 431-433, 439
- σύγχρονη ταχύτητα, 283, 295, 315, 342, 343, 363, 364, 366, 380, 381, 412, 440, 455, 456, 463, 465, 485, 486, 500
- σύγχρονος αριθμός στροφών, 280, 282, 294, 350, 351, 377, 456
- σύνδεση κατά Dahlander, 280, 281
- » κατά αστέρα, 16, 17, 320
- » κατά τρίγωνο, 16, 17, 104, 319, 320
- συντελεστής επαγωγιμότητας, 32
- » Carter, 293
- » κλίσεως, 347, 348, 496
- συντελεστής σκέδασης, 55
- » Rogowski, 124
- σύστημα Ward-Leonard, 226
- » διέγερσης, 359-363
- σύστημα ελέγχου, 322, 324
- » ήπιας (ομαλής) εκκίνησης, 322
- » μηδενικής φάσης, 109, 110, 112, 113
- » συνεχούς ρεύματος, 61
- » ψύξης των ΜΤ, 69
- συχνότητα συντονισμού, 449, 450
- σχετική διαπερατότητα, 28, 72
- τάση αναστροφής, 200, 201, 203, 204, 205
- » βραχυκύκλωσης, 80
- » , σχετική, 80, 90, 96, 245, 246, 247
- τάση εξ επαγωγής, 173, 232, 275
- ταχύτητα δρομέα, 233, 235, 265, 294, 295, 299, 343, 344, 365, 380, 383, 451, 465, 500
- ταχύτητα πεδίου, 284
- ταχύτητα στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, 295, 350
- ταχύτητα συλλέκτη, 200, 205
- » τυμπάνου, 205
- τριγωνική κυματομορφή, 3
- τριφασικό σύστημα, 16, 64, 112, 282, 285, 297, 363
- τύλιγμα Röbel, 460
- » απλής στρώσης, 274
- τύλιγμα απόσβεσης, 35-355, 372, 427-434, 444, 455, 463, 464, 500
- τύλιγμα, βαθμωτό, 158
- τύλιγμα, βοηθητικό 105, 110, 193, 195, 196, 202, 208, 260, 262, 470, 471, 472, 473, 474
- τύλιγμα διέγερσης, 146, 181, 185-187, 213, 216, 217, 219, 225, 232, 235, 250-253, 258-260, 261, 274, 350-353, 360-363, 367, 372, 387, 402-407, 415-417, 420, 425, 426-437, 444, 450-456, 459, 463, 464, 488, 490
- τύλιγμα διέγερσης, κατανεμημένο, 351, 352, 353, 387, 403, 406, 407, 416, 425, 426, 436, 437, 450, 488, 490
- τύλιγμα διπλής στρώσης, 157, 274
- » διπλής στρώσης, μονοφασικό, 269
- » διφασικό, 269, 472
- » κανονικό, 157, 158
- » κυματοειδές ή κυματοτύλιγμα, 159
- » μηχανών συνεχούς ρεύματος, 156

τύλιγμα, παράλληλο, 94, 218

» σειράς, 94

τύλιγμα, τριφασικό, 269, 276, 280, 285, 292, 340, 350, 355, 359, 362, 366, 407, 408, 414, 465

τύλιγμα χορδής, 158

τυλίγματα Α.Μ. 274

» κυλινδρικά και δισκοειδή, 66

τύπος του Pichelmayer, 206

» » Kloss, 307, 492

φαινομένη ισχύς, 11, 12, 14, 320, 489

φασικά ρεύματα, 105, 109, 288, 336, 408, 427

φασική τάση, 101, 102, 104, 323, 467

φυγοκεντρικές δυνάμεις, 18, 147, 225, 269, 272, 351, 355, 356

χρονική συνάρτηση, 5, 112, 115, 154, 199, 200, 201, 231, 260, 290, 427, 443, 446, 450

ψύξη ΜΤ, 68, 69, 136, 138, 139

ψύξη Σ.Μ., 349, 351, 356

ωμική αναστροφή, 201

ωμική αντίσταση, 23, 26, 38, 46, 47, 56, 73, 81, 136, 175, 176, 186, 225, 232, 233, 248, 299, 313, 321, 356, 376, 382, 395, 399, 435, 436, 464, 471, 474

Σύντομο βιογραφικό του συγγραφέα

Ο Αθανάσιος Σαφάκας του Νικολάου γεννήθηκε στην Αμφιλοχία στις 13/01/1943, όπου περάτωσε τη στοιχειώδη και μέση εκπαίδευση. Το 1961 έκανε την προετοιμασία για σπουδές στο Πολυτεχνείο της Karlsruhe (Δ. Γερμανία), Technische Hochschule Karlsruhe, όπου σπούδασε, και το 1967 απέκτησε το δίπλωμα Diplom Ingenieur και μετά τριετία έλαβε τον τίτλο Doktor Ingenieur. Το 1975 εκλέχθηκε Τακτικός Καθηγητής Ηλεκτρομηχανικής Επιτροπής Ενέργειας, όπου υπηρέτησε μέχρι τη συνταξιοδότησή του, την 01/09/2010. Δίδαξε Ηλεκτρικές Μηχανές Ι και ΙΙ στο τρίτο έτος των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (υποχρεωτικά μαθήματα στο πρόγραμμα) και Ηλεκτρονικά Ισχύος και Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα που ήταν κατ' επιλογήν τα δύο τελευταία έτη σπουδών.

Το δημοσιευμένο ερευνητικό του έργο στα αντικείμενα που δίδασκε περιλαμβάνουν περίπου 60 εργασίες σε διεθνή γερμανικά και αγγλικά περιοδικά, 160 εργασίες σε Διεθνή Συνέδρια, 20 εργασίες σε ελληνικά περιοδικά, 80 εργασίες σε Ελληνικά Συνέδρια, 9 διδακτικά βιβλία για τις πανεπιστημιακές παραδόσεις και άλλες επιστημονικές εργασίες.

Είχε τη Διεύθυνση του Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας και υπηρέτησε ως Πρύτανης του Πανεπιστημίου Πατρών, ως Κοσμήτορας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, ως Πρόεδρος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών και σε πολλές άλλες θέσεις της Πολιτείας και του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Διετέλεσε κριτής επιστημονικών εργασιών διαφόρων διεθνών περιοδικών και Διεθνών Συνεδρίων. Συνεχίζει την έρευνα σε θέματα Ηλεκτρικής Ενέργειας και συνεχίζει να είναι κριτής επιστημονικών εργασιών.