

ΓΙΑΝΝΗ ΣΥΠΤΕΡΑ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΤΟΜΟΣ ΙΙ

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό –που εκδίδεται ύστερα από τη θετική αποδοχή του Τόμου Ι από τους φοιτητές και τον ευρύτερο χώρο των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών– αποτελεί μια εισαγωγή στις *Σύγχρονες Μηχανές* και γράφτηκε με βάση τα περιεχόμενα των μαθημάτων που διδάσκονται οι φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Α.Π.Θ. Σε μερικά κεφάλαια υπερκαλύπτει την ύλη των σχετικών διαλέξεων.

Όπως και στον Τόμο Ι, η προσέγγιση της ύλης επιλέχθηκε με γνώμονα όχι μόνο τη δημιουργία μιας ικανοποιητικής θεωρητικής υποδομής αλλά και την κατανόηση των φυσικών φαινομένων και την καλύτερη αφομοίωση των βασικών νόμων συμπεριφοράς των Ηλεκτρικών Μηχανών με προοπτική την αξιοποίηση της μεταδιδόμενης γνώσης από τους μέλλοντες Μηχανικούς μας στις εφαρμογές. Με το ίδιο πνεύμα έγιναν και οι κατασκευαστικές περιγραφές.

Για τους ανωτέρω λόγους το βιβλίο αυτό αποτελεί ένα πολύτιμο βοήθημα και για τους Διπλωματούχους Μηχανικούς.

Συνιστώ εκθύμως στους αγαπητούς φοιτητές μου, να μην περιορίζονται μόνο στη διδαχθείσα ύλη, αλλά να διαβάζουν όλο το βιβλίο το οποίο για ευνόητους λόγους την υπερκαλύπτει. Εδώ βέβαια πρέπει να τονισθεί, προς αποφυγή πάσης παρεξηγήσεως, ότι και το αντίστροφο, δηλαδή η μελέτη του βιβλίου μόνο, είναι τελείως λανθασμένο, διότι η ζωντανή διάλεξη με την παραστατικότητα που από τη φύση της ενέχει, τη δυνατότητα διαλόγου και την αμφίδρομη πνευματική προσπέλαση στο χώρο της κατανόησης μεταξύ διδάσκοντος και διδασκόμενου που προσφέρει, είναι για το φοιτητή «εκ των ουκ άνευ».

Το βιβλίο είναι αυτοτελώς αναγνώσιμο και κατανοητό, εκτός από ελάχιστες αναφορές π.χ. για τη διέγερση του μαγνητικού πεδίου στον Τόμο Ι. Επιχειρείται εν τούτοις και η ομαλή μετάβαση από τη θεωρία της Ασύγχρονης Μηχανής στη Σύγχρονη όπου η δεύτερη παρουσιάζεται ως ειδική περίπτωση της πρώτης με μηδενική ολίσθηση (υποκ. 2.1).

Στη σύντομη κατασκευαστική περιγραφή του κεφ. 1 περιλαμβάνονται και οι σπουδαιότερες μέθοδοι διέγερσης. Στο κεφ. 2 γίνεται μια εκτενέστερη θεωρητική - μαθηματική πραγμάτωση της Σ.Μ. κυλινδρικών πόλων στη λει-

τουργία φόρτισης σε παθητικό και ενεργητικό δίκτυο, το δεύτερο με σταθερή τάση και συχνότητα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εμβάθυνση στις νομοτέλειες που διέπουν τις Σ.Μ. εν γένει. Ειδικότερα στο υποκ. 2.4 (Αρχή λειτουργίας της Σ.Μ.) επιχειρείται η φυσική κατανόηση των φαινομένων με ελαχιστοποιημένη μαθηματική ανάλυση.

Το κεφ. 3 περιέχει τη θεωρία της Σ.Μ. εκτύπων πόλων με τις ιδιαιτερότητές της, βασισμένη βέβαια στη θεωρία της Σ.Μ. κυλινδρικών πόλων. Μεταξύ των άλλων περιγράφεται λεπτομερώς και μια μέθοδος υπολογισμού των σύγχρονων αντιδράσεων X_d και X_q από τα κατασκευαστικά δεδομένα.

Οι μέθοδοι παραλληλισμού με θεωρητική ανάλυση δίνονται στο κεφ. 4.

Κάποια έκταση δίνεται στην πραγμάτευση των μεταβατικών φαινομένων στο κεφ. 5. Πρώτα εξετάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα (απότομη βραχυκύκλωση) μικρής χρονικής διάρκειας σε Σ.Μ. όπου η αδράνεια του δρομέα κρατά σταθερή την περιστροφική ταχύτητα. Στη συνέχεια εξετάζονται οι ταλαντώσεις Σ.Μ. παραλληλισμένων σε ενεργό δίκτυο, το δυσκολότερο πρόβλημα του κεφαλαίου αυτού. Και στο τέλος οι ταλαντώσεις Σ.Μ. σε παθητικό δίκτυο.

Μερικά από τα σχήματα και τις φωτογραφίες είναι παρμένα από τη βιβλιογραφία και τις εταιρίες KWU, SIEMENS, AEG, ELIN και ALLIS-CHALMERS.

Στις διορθώσεις των κειμένων και στο συντονισμό των διαφόρων εργασιών συνέβαλε σημαντικά ο συνεργάτης του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών του Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος - Μηχανικός κύριος *Χρήστος Μαδεμλής*.

Η γραφή του πρώτου κειμένου έγινε από την κυρία *Νικολέττα Παπαδοπούλου*, μέλος του Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας, με τη γνωστή της προθυμία και ταχύτητα.

Η σχεδίαση των περισσότερων σχημάτων έγινε από την κυρία *Κατερίνα Παλούρα* μέλους του ΕΔΤΠ του ίδιου Τομέα, με τη γνωστή προθυμία και επιμέλεια.

Τη διόρθωση των σχημάτων, τη σχεδίαση αρετών από αυτά και την έκδοση ανέλαβε ο Οίκος «Εκδόσεις Ζήτη». Ο κύριος *Νίκος Ζήτης* είχε την επιμέλεια της ταχείας έκδοσης.

Θεομές ευχαριστίες σε όλους τους ανωτέρω συντελεστές της έκδοσης του βιβλίου αυτού.

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 1996

Γιάννης Ξυπτεράς
Αναπληρωτής Καθηγητής
Διευθυντής του Εργαστηρίου
Ηλεκτρικών Μηχανών του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

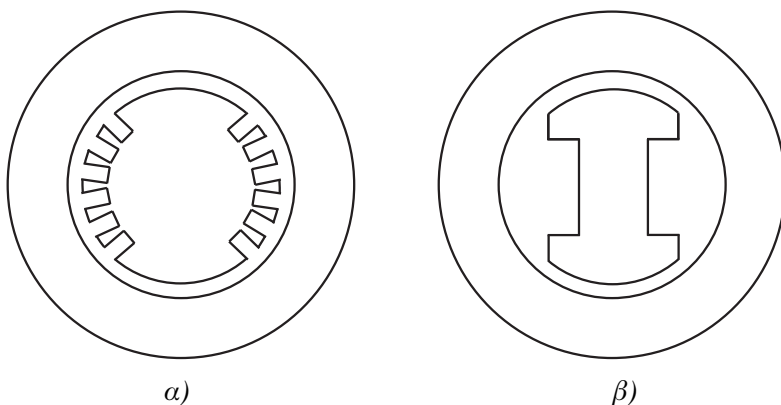
1. Εισαγωγή - Κατασκευαστική Περιγραφή.....	11
1.1. Κατασκευαστικά.....	14
1.1.1. Στάτης.....	14
1.1.2. Δρομέας.....	14
1.1.3. Κλωβός απόσβεσης.....	18
1.1.4. Ψύξη.....	19
1.1.5. Τάσεις.....	21
1.2. Πηγή διέγερσης.....	21
1.2.1. Διεγέρτρια στον ίδιο άξονα με τη ΣΓ.....	21
1.2.2. Ανεξάρτητη διεγέρτρια.....	23
1.2.3. Ανορθωτής χωρίς διεγέρτρια.....	23
2. Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικών πόλων.....	25
2.1. Η ΣΜ ως ειδική περίπτωση της Γενικής Μηχανής περιστρεφόμενου πεδίου.....	25
2.2. Λειτουργία εν κενώ.....	27
2.2.1. Το μαγνητικό πεδίο.....	27
2.2.2. Εύρεση της χαρακτηριστικής κενού με μετρήσεις.....	28
2.2.3. Θεωρητικός υπολογισμός.....	29
2.3. Λειτουργία φόρτισης σε παθητικό δίκτυο.....	34
2.3.1. Θεωρητικός υπολογισμός.....	34
2.3.2. Διανυσματικό διάγραμμα.....	37
2.3.3. Αντίδραση τυμπάνου.....	38
2.3.4. Μαγνητικός κορεσμός.....	39
2.3.5. Βραχυκυκλώματα στη μόνιμη κατάσταση.....	41
2.3.5.1. Γενικά.....	41
2.3.5.2. Τριφασικό βραχυκύκλωμα.....	42
2.3.5.3. Διφασικό και μονοφασικό βραχυκύκλωμα.....	45
2.3.5.4. Σχέση κενού - βραχυκύκλωσης.....	47
2.3.6. Χαρακτηριστικές.....	49
2.3.6.1. Χαρακτηριστικές άεργης ισχύος.....	49
2.3.6.2. Χαρακτηριστικές φόρτισης $U_1 = f(I_1)$ με σταθερό ΣΙ.....	57
2.3.6.3. Χαρακτηριστικές ρύθμισης $I_f = f(I_1)$ με σταθερό ΣΙ.....	60
2.3.7. Απώλειες ισχύος - Βαθμός απόδοσης.....	63
2.3.8. Ηλεκτρομαγνητική ροπή στρέψης.....	65

2.4. Αρχή λειτουργίας της ΣΜ.....	69
2.5. Λειτουργία σε ενεργό δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότη- τας.....	74
2.5.1. Έλεγχος της πραγματικής και άεργης ισχύος - Καταστάσεις διέγερσης.....	74
2.5.2. Λειτουργικό διάγραμμα.....	77
2.5.3. Οι καμπύλες V	79
3. Σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων.....	81
3.1. Θεωρία.....	81
3.1.1. Ανάλυση του ρεύματος I_1 στη διαμήκη συνιστώσα I_d και την εγκάρσια I_q	81
3.1.2. Μαγνητικά πεδία και σύγχρονες αντιδράσεις X_d και X_q	83
3.1.3. Εξισώσεις τάσεων - Διανυσματικό διάγραμμα ακόρεστης μη- χανής.....	89
3.1.4. Χαρακτηριστική κενού και μαγνήτισης.....	93
3.1.5. Διανυσματικό διάγραμμα κορεσμένης μηχανής - Καθορισμός των X_{hd} και X_{hq}	94
3.1.6. Λειτουργικό διάγραμμα.....	95
3.1.7. Ηλεκτρομαγνητική ροπή στρέψης.....	96
3.1.8. Ροπή αντίδρασης - Κινητήρας μαγνητικής αντίστασης.....	97
4. Παράλληλισμός σύγχρονων γεννητριών.....	99
5. Μεταβατικά φαινόμενα.....	105
5.1. Μεταβατικά φαινόμενα με σταθερή περιστροφική ταχύτητα του δρομέα.....	105
5.1.1. Απότομη βραχυκύκλωση.....	106
5.1.2. Αντιδράσεις και χρονικές σταθερές των μεταβατικών φαινομέ- νων.....	113
5.1.2.1. Αντιδράσεις και χρονικές σταθερές χωρίς κλωβό από- σβεσης.....	113
5.1.2.2. Αντιδράσεις και χρονικές σταθερές με κλωβό απόσβε- σης.....	115
5.2. Ταλαντώσεις ΣΜ παραλληλισμένων σε δίκτυο.....	117
5.2.1. Ευστάθεια λειτουργίας των ΣΜ.....	118
5.2.1.1. Συγχρονιστική ροπή.....	118
5.2.1.2. Στατική Ευστάθεια.....	119
5.2.1.3. Δυναμική Ευστάθεια.....	121
5.2.2. Η εξίσωση κίνησης και οι ταλαντώσεις.....	123
5.2.2.1. Ελεύθερες ταλαντώσεις.....	123
5.2.2.2. Αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις.....	132
5.2.2.3. Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις.....	133

5.2.2.3.1. Ταλαντώσεις ΣΜ σε σταθερό δίκτυο.....	133
5.2.2.3.2. Ταλαντώσεις ΣΜ σε ταλαντούμενο δίκτυο	140
5.2.2.3.3. Υπολογισμός της ροπής αδράνειας σε παράλληλη λειτουργία	141
5.3. Ταλαντώσεις ΣΜ σε παθητικό δίκτυο.....	142
5.3.1. Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις.....	142
5.3.2. Υπολογισμός της ροπής αδράνειας.....	144
<i>Βιβλιογραφία</i>	145
<i>Παράρτημα I</i>	147
<i>Παράρτημα II</i>	148
<i>Ευρετήριο</i>	150

1 Εισαγωγή - Κατασκευαστική Περιγραφή

Οι πρώτες σύγχρονες γεννήτριες –μονοφασικές– κατασκευάστηκαν στα μέσα του περασμένου αιώνα και τροφοδοτούσαν κυρίως την κατανάλωση εγκαταστάσεων φωτισμού. Οι πρώτες τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες κατασκευάστηκαν συγχρόνως και ανεξάρτητα μεταξύ των από τους Bradley και Hasenwander. Οι μηχανές αυτές είχαν δρομέα εκτύπων πόλων. Αργότερα, το 1901, ο Charles E.L. Brown κατασκεύασε την σύγχρονη μηχανή κυλινδρικών πόλων. Οι δύο αυτοί κατασκευαστικοί τύποι θα περιγραφούν στη συνέχεια.



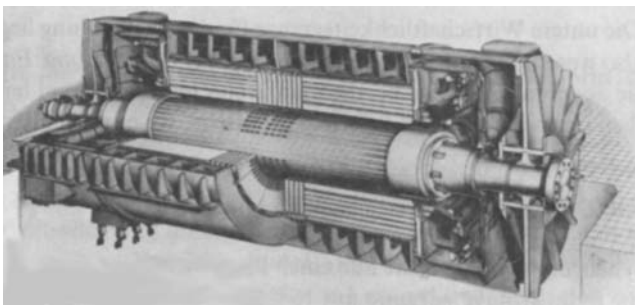
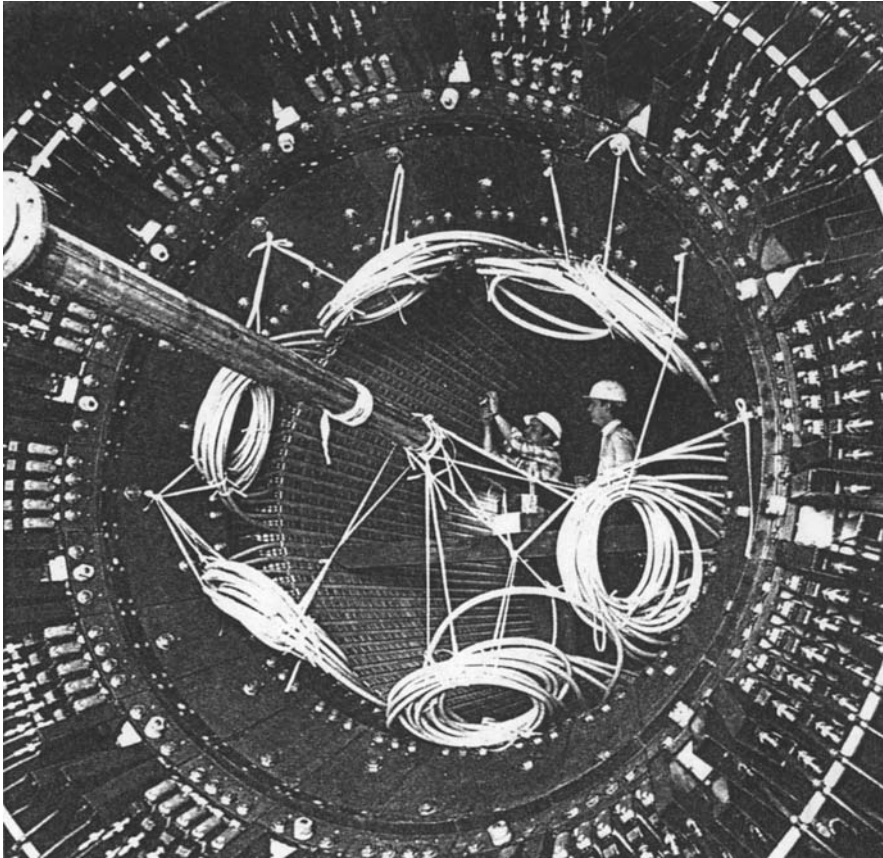
Σχήμα 1.1

Σχηματική διατομή των πυρήνων χωρίς τα αυλάκια του στάτη.

α) Δρομέας κυλινδρικών πόλων. β) Δρομέας εκτύπων πόλων

Η ηλεκτρική ενέργεια σήμερα παράγεται σχεδόν αποκλειστικά από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες. Οι οριακές ισχείς κατασκευής είναι περίπου 2000 MVA για γεννήτριες κυλινδρικών πόλων που κινούνται από ατμοστρόβιλους και 1000 MVA για γεννήτριες εκτύπων πόλων που κινούνται από υδροστρόβιλους.

Οι λόγοι προτίμησης της σύγχρονης μηχανής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι κυρίως δύο: πρώτον διότι η παραγόμενη συχνότητα εξαρτά-



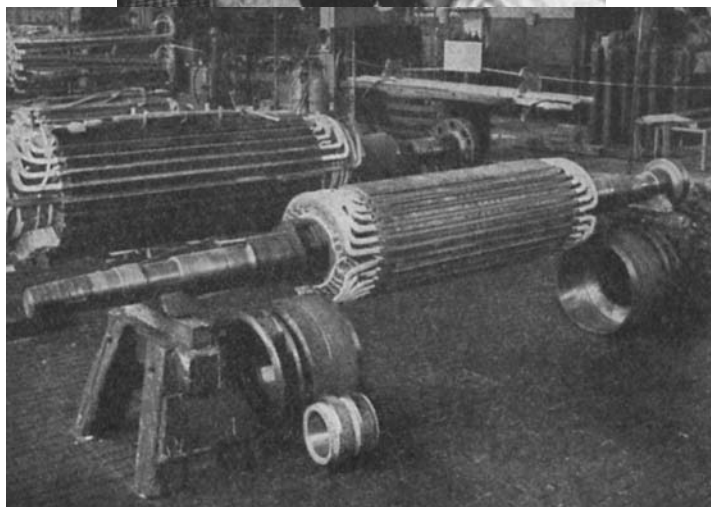
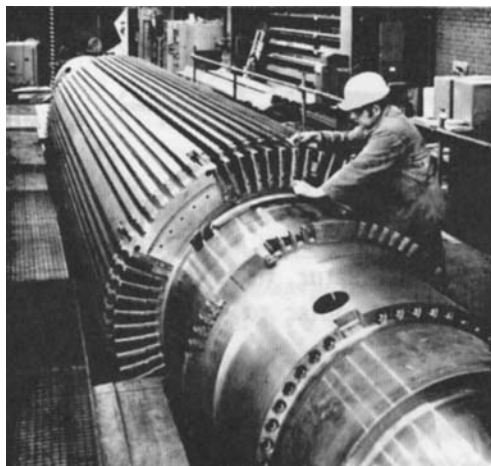
Σχήμα 1.2

Στροβιλογεννήτριες (κυλινδρικών πόλων).

- α) Στάτης μεγάλης γεννήτριας με υδρόψυκτη περιέλιξη (KWU, Βραζιλία).
 β) 400 MVA, περιέλιξη στάτη υδρόψυκτη, περιέλιξη δρομέα με άμεση ψύξη H_2 .

ται μόνο από την περιστροφική ταχύτητα της κινούσας μηχανής και όχι από τα ηλεκτρικά φορτία και δεύτερον, διότι η σύγχρονη μηχανή παράγει και την άεργο ισχύ που απαιτούν οι επαγωγικοί καταναλωτές, που είναι κυρίως οι κινητήρες.

Ένα σημαντικό κατασκευαστικό προτέρημα της σύγχρονης μηχανής έναντι της ασύγχρονης είναι το μεγάλο διάκενο (5-50 mm) της πρώτης έναντι του μικρού (0,5-5 mm) της δεύτερης. Ο λόγος έγκειται στο ότι το αναγκαίο και στις δύο περιπτώσεις μαγνητικό πεδίο στις μεν ΣΜ διεγείρεται εύκολα και φθηνά από την σχετικά μικρής ισχύος ΣΡ περιέλιξη διέγερσης του δρομέα,



Σχήμα 1.3

Δρομείς κυλινδρικών πόλων ΣΓ.

- α) 1630 KVA, 1500 rpm πριν τοποθετηθεί η περιέλιξη διέγερσης.
β) Με περιέλιξη διέγερσης.

στις δε ΑΜ διεγείρεται από το δίκτυο, δηλαδή το ρεύμα μαγνήτισης κυκλοφορεί στην περιέλιξη του στάτη, αυξάνοντας το ρεύμα φόρτισης και μειώνοντας τον ΣΙ. Για το λόγο αυτό πρέπει το ρεύμα μαγνήτισης να είναι μικρό και επομένως το διάκενο πολύ μικρό.

Σύγχρονοι κινητήρες

Οι εφαρμογές ΣΜ σε λειτουργία κινητήρα είναι σπάνιες. Μειονεκτούν έναντι των ασύγχρονων κινητήρων σε κόστος κατασκευής και συντήρησης, στην εκκίνηση και λόγω του φαινομένου των ταλαντώσεων. Πλεονεκτούν βεβαίως στο ότι η ελεγχόμενη διέγερση μπορεί να επιτύχει $\cos\varphi = 1$ ή και να δίνει ακόμα άεργη ισχύ στο δίκτυο. Οι ΣΚ χρησιμοποιούνται σε κινήσεις που απαιτούν σταθερή περιστροφική ταχύτητα, κυρίως σε εφαρμογές μικρής και πολύ μικρής ισχύος όπως π.χ. ρολόγια, συσκευές αναπαραγωγής ήχου (pick up, κασετόφωνα) κ.λπ.

1.1. Κατασκευαστικά

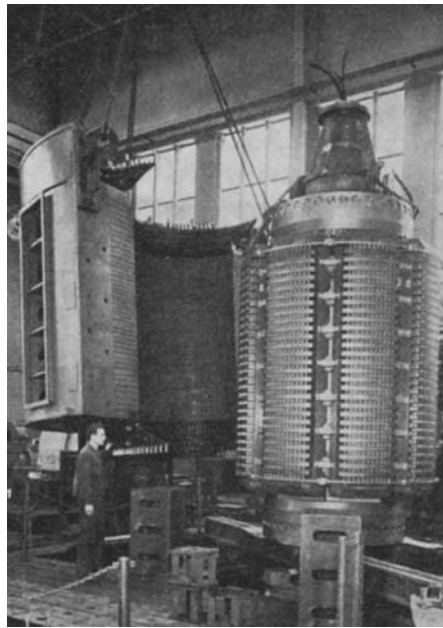
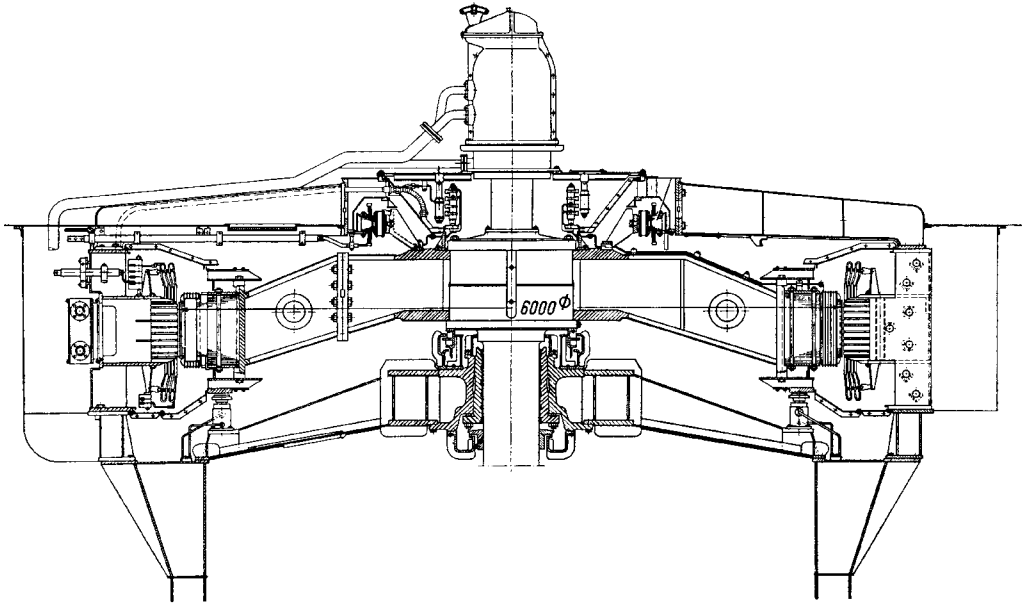
1.1.1. Στάτης

Ο στάτης είναι κατασκευασμένος όπως στην ασύγχρονη μηχανή: πυρήνας από δυναμοελάσματα, τριφασικά ή μονοφασικά (σε μικρές ισχύεις) περιέλιξη που διεγείρει αντίστοιχα στρεφόμενο (ή εναλλασσόμενο) μαγνητικό πεδίο.

Λόγω των μεγάλων διατομών που συνεπάγονται οι μεγάλες ισχύεις ακόμα και στις υψηλές τάσεις το ακτινικό ύψος των αγωγών, που είναι συνήθως ορθογώνιας παραλληλόγραμμης διατομής, είναι μεγάλο, με αποτέλεσμα το επιδερμικό φαινόμενο, εδώ φαινόμενο μονόπλευρης συνώθησης (βλέπε Τόμος Ι, κεφ. 6.1.4), να είναι σημαντικής εντάσεως και να κυκλοφορούν μη αμελητέα δινορρέυματα με τις αντίστοιχες απώλειες. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση των αγωγών Röbel που αποτελούνται από περισσότερους επί μέρους παράλληλους αγωγούς έτσι "περιστραμένους" ώστε ο καθένας από αυτούς να μεταβάλλει ακτινικά τη θέση του. Με τον τρόπο αυτό οι επί μέρους αγωγοί είναι πεπλεγμένοι με την ίδια ροή σκέδασης και έχουν ίσα ρεύματα, δηλαδή αποφεύγεται η μονόπλευρη συνώθηση (Σχ. 1.6).

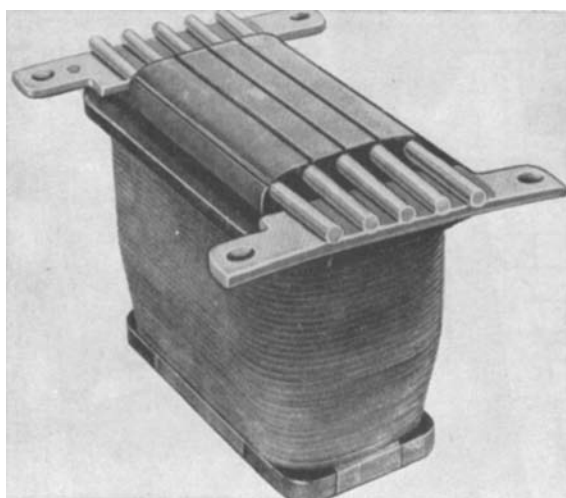
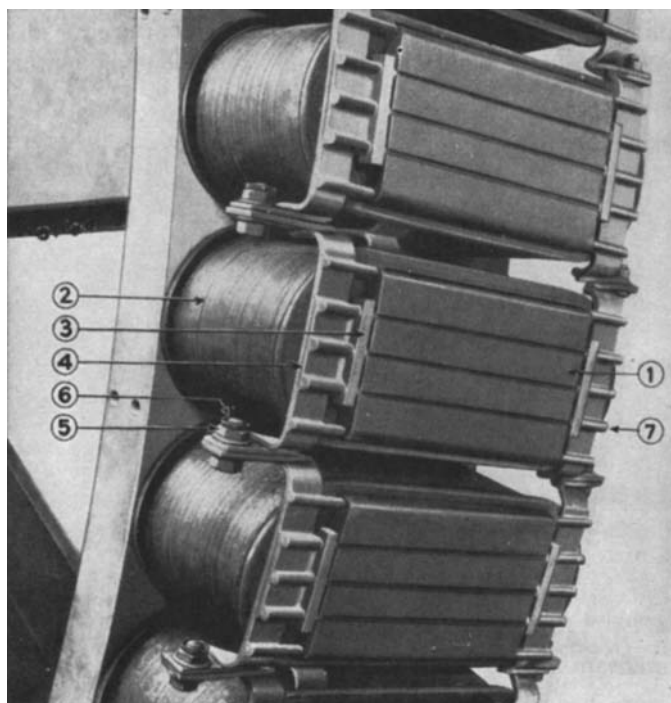
1.1.2. Δρομέας

Στο δρομέα υπάρχει η *περιέλιξη διέγερσης* στην οποία κυκλοφορεί συνεχές ρεύμα που διεγείρει ένα συνεχές, για το δρομέα, μαγνητικό πεδίο το οποίο συμπεριστρέφεται με αυτόν και επάγει τριφασική τάση στην περιέ-



Σχήμα 1.4

- α) Τομή γεννήτριας υδροστροβίλου (εκτύπων πόλων) 8,8 MVA, 125 rpm με διεγέρτρια στον άξονα 190 KVA (SSW).
- β) Κάθετη γεννήτρια υδροστροβίλου 56 MVA, 750 rpm (ELIN).



Σχήμα 1.5

α) Δρομέας σύγχρονου κινητήρα εκτύπων πόλων 1) Πυρήνας δυναμοελασμάτων, 2) Περιέλιξη διέγερσης, 3) Ελάσματα συγκράτησης, 4) Δακτύλιοι βραχυκύκλωσης, 5) και 6) Σύνδεση δακτυλίων με κοχλίωση, 7) Ράβδοι κλωβού (Allis-Chalmers Mfg.Co).

β) Έκτυπος πόλος σύγχρονου κινητήρα.

Σχήμα 1.6

Περιστροφή των παραλλήλων επιμέρους αγωγών σε αυλάκι με αγωγούς Roebel.

λιξη του στάτη. Οι πυρήνες του δρομέα είναι από συμπαγή σίδηρο, διότι δεν υπάρχουν δινορρεύματα στη σύγχρονη λειτουργία.

Όπως αναφέραμε υπάρχουν δύο είδη δρομέων:

α) Ο Δρομέας κυλινδρικών πόλων

ή λείος ή κατανεμημένης περιέλιξης (Σχ. 1.1α, Σχ. 1.2β, Σχ. 1.3β).

Κατασκευάζεται από συμπαγή σίδηρο. Τα αυλάκια της περιέλιξης ανοίγονται με φρεζάρισμα και καταλαμβάνουν περίπου τα $\frac{2}{3}$ της περιφέρειας.

Οι γεννήτριες κυλινδρικών πόλων, που είναι στην πλειοψηφία τους διπολικές και σπανίως τετραπολικές, κινούνται από ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους (**στροβιλογεννήτριες**), έχουν οριακή ισχύ πάνω από 2000 MVA. Οι διπολικές έχουν υψηλή περιστροφική ταχύτητα, 3000 rpm στα 50 Hz και 3600 rpm στα 60 Hz. Επειδή οι φυγοκεντρικές δυνάμεις είναι μεγάλες, η διάμετρος του δρομέα είναι σχετικά μικρή, το πολύ 1,4 m και κατά συνέπεια το μήκος του μεγάλο.

β) Ο Δρομέας εκτύπων πόλων

ή διαμορφωμένων πόλων ή συγκεντρωμένης περιέλιξης (Σχ. 1.1β, Σχ. 1.4β, Σχ.1.5).

Οι πόλοι είναι κατασκευασμένοι από συμπαγή σίδηρο, τα πέλματά τους

όμως συχνά είναι κατασκευασμένα από δυναμοελάσματα για την αποφυγή κυκλοφορίας σε αυτά δινορρευμάτων που οφείλονται στις μικρές διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου που προκαλούν οι σχισμές των αυλακιών του στάτη.

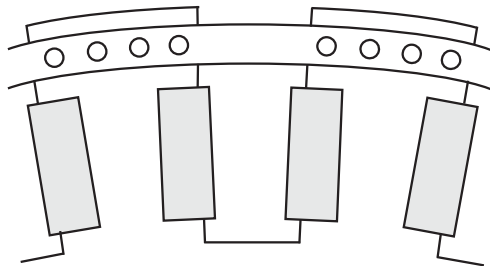
Οι γεννήτριες εκτύπων πόλων που είναι πολυπολικές ($2p = 6$ έως 64) και κινούνται από υδροστροβίλους, έχουν οριακή ισχύ περίπου 1000 MVA. Η περιστροφική τους ταχύτητα είναι χαμηλή (1000 έως 94 rpm αντίστοιχα του αριθμού πόλων) στα 50 Hz. Επειδή οι φυγοκεντρικές δυνάμεις είναι μικρές, ο δρομέας έχει μεγάλη διάμετρο, έως 15 m και κατά συνέπεια μικρό μήκος.

1.1.3. Κλωβός απόσβεσης

Οι ΣΜ είναι ευαίσθητες σε ταλαντώσεις του δρομέα (αυξομειώσεις της περιστροφικής ταχύτητας) που συνεπάγονται ενοχλητικές αυξομειώσεις της τάσης και της συχνότητας. Τις ταλαντώσεις αυτές αποσβένει ικανοποιητικά ο κλωβός απόσβεσης που λειτουργεί όπως ο βραχυκυκλωμένος κλωβός της ασύγχρονης μηχανής, όταν υπάρχει ολίσθηση της περιστροφικής ταχύτητας. Εκτός τούτου ο κλωβός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κλωβός εκκίνησης στην περίπτωση Σύγχρονου Κινητήρα.

Στις ΣΜ κυλινδρικών πόλων οι ράβδοι χαλκού του κλωβού απόσβεσης τοποθετούνται στα αυλάκια του δρομέα μεταξύ των αγωγών διέγερσης και των σφηνών των αυλακιών και βραχυκυκλώνονται στα δύο μέτωπα με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Μερικές φορές οι σφήνες (που είναι απαραίτητες για να κρατούνται οι αγωγοί των περιελίξεων στη θέση τους) είναι από ΑΙ και αποτελούν συγχρόνως τον κλωβό απόσβεσης.

Στις ΣΜ εκτύπων πόλων οι ράβδοι του κλωβού τοποθετούνται σε ειδικά αυλάκια στα πέλατα των πόλων και βραχυκυκλώνονται στα μέτωπα (Σχ. 1.7 και Σχ. 1.5).



Σχήμα 1.7

Εκτυποι πόλοι με βραχυκυκλωμένο κλωβό.

1.1.4. Ψύξη

Οι σύγχρονες μηχανές μέχρι περίπου 50 MVA ψύχονται συμβατικά (με εσωτερικούς και εξωτερικούς ανεμιστήρες) με **αέρα**. Στις ΣΜ εκτύπων πόλων είναι ευκολότερη η ψύξη λόγω των μεγάλων διαμέτρων και του στροβιλισμού. Στις ΣΜ όμως κυλινδρικών πόλων η ψύξη είναι δυσκολότερη.

Για μεγαλύτερες ισχείς μέχρι 250 MVA, χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο το **υδρογόνο** το οποίο έχει τα πλεονεκτήματα μικρότερων απωλειών τριβών, λόγω μικρότερου ειδικού βάρους και μεγαλύτερου συντελεστή συναγωγής ο οποίος αυξάνεται ακόμα περισσότερο με πίεση μέχρι 4 bar. Το πρόβλημα πρέπει να είναι στεγανό και ανθεκτικό στην πίεση. Το ζεστό υδρογόνο οδηγείται σε ψύκτες νερού όπου ψύχεται και επιστρέφει με ανεμιστήρες - κυκλοφορητές στο εσωτερικό της μηχανής.

Σε μηχανές μεγαλύτερων ισχύων το πρόβλημα της ψύξης γίνεται οξύτερο γιατί ως γνωστόν οι απώλειες αυξάνονται σχετικά περισσότερο από ό,τι οι επιφάνειες που απάγουν τη θερμότητα. Παρόλο το μεγάλο βαθμό απόδοσης των γεννητριών μεγάλων ισχύων, οι απώλειες, η θερμότητα των οποίων πρέπει να απαχθεί, είναι πολύ υψηλές π.χ. σε ΣΓ 1000 MVA με $\cos\varphi=0,86$ και $\eta = 99\%$, οι συνολικές απώλειες είναι 8,6 MW(!). Τη λύση την έδωσε η μέθοδος της **άμεσης ψύξης**. Οι αγωγοί των περιελίξεων είναι *κοίλοι*. Το ψυκτικό μέσο (**H₂, λάδι ή απεσταγμένο νερό**) κυκλοφορεί στο εσωτερικό των αγωγών και απάγει τη θερμότητα στον τόπο έκλυσής της (Σχ. 1.8). Η μέθοδος της άμεσης ψύξης βέβαια, ιδιαίτερα όταν το ψυκτικό μέσο είναι υγρό και ιδιαίτερα όταν το υγρό κυκλοφορεί στους κοίλους αγωγούς του περιστρεφόμενου δρομέα, είναι συνυφασμένη με πολλά τεχνικά προβλήματα και εφαρμόζεται μόνο σε γεννήτριες πολύ μεγάλων ισχύων.

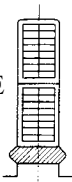
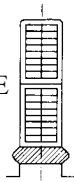


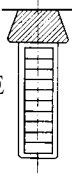
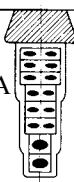
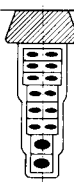
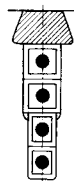
Σχήμα 1.8

- Αυλάκι δρομέα με άμεση ψύξη H₂. 1. Σφήνα, 2. Ράβδος κλωβού απόσβεσης, 3. Περιέλιξη διέγερσης με κοίλους αγωγούς.
- Αυλάκι στάτη με άμεση υδρόψυξη. 1. Σφήνα, 2. Αγωγός Roebel με μερικούς κοίλους επιμέρους αγωγούς.

Ο Πίνακας 1.1 δίνει **ενδεικτικά** τις περιοχές εφαρμογής των ψυκτικών μεθόδων. Η επικάλυψη των περιοχών αυτών οφείλεται σε διάφορους παράγοντες τεχνικής και οικονομικής φύσεως.

Πίνακας 1.1

Συστήματα ψύξης: *E* = Έμμεση ψύξη, *A* = Άμεση ψύξη.

Στάτης				
Ψύξη	Αέρας	H ₂	H ₂ O	H ₂ O
Δρομέας				
Ψύξη	Αέρας	H ₂	H ₂ O	H ₂ O
MVA	÷50	50÷250	150÷1400	500÷

Άμεση ψύξη με H₂ των κοίλων αγωγών της διέγερσης στο δρομέα γίνεται σε ΣΜ της περιοχής ισχύος 50-1400 MVA (Σχ. 1.8α). Το υδρογόνο εισρέει στους αγωγούς και από τις δύο πλευρές του δρομέα και εκρέει ακτινικά στη μέση του από τρύπες των αγωγών.

Στην άμεση ψύξη με λάδι ή νερό των κοίλων αγωγών του στάτη ή/και του δρομέα το νερό, που καθαρίζεται πλήρως από τα ιόντα του, με την βοήθεια απιονιστή, κυκλοφορεί με τη βοήθεια αντλίας. Στην περιοχή ισχύος 150-1400 MVA εφαρμόζεται άμεση ψύξη με υγρό (νερό ή λάδι) στην περιέλιξη του στάτη και άμεση ψύξη με H₂ στην περιέλιξη του δρομέα (Σχ. 1.2).

Στην περιοχή των μέγιστων ισχύων 500 μέχρι 2500 MVA εφαρμόζεται η άμεση ψύξη και στον περιστρεφόμενο δρομέα, με την δυσκολία βέβαια της στεγάνωσης. Το υγρό εισρέει από τον κοίλο άξονα στους κοίλους αγωγούς και εκρέει από αυτούς με τη βοήθεια ακίνητων συλλεκτών με καλή στεγάνωση έναντι των περιστρεφόμενων μερών.

Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες που επιτυγχάνει η άμεση ψύξη καθιστούν τη μόνωση ανθεκτικότερη και μακροβιότερη.

1.1.5. Τάσεις

Η τάση της περιέλιξης του στάτη είναι μέχρι 30 KV. Οι προδιαγεγραμμένες τιμές της τάσης είναι 400, 500, 3000, 5000, 6000, 10000, 15000, 16000, 21000, 24000, 25000, 27000 και 30000 V.

1.2. Πηγή διέγερσης

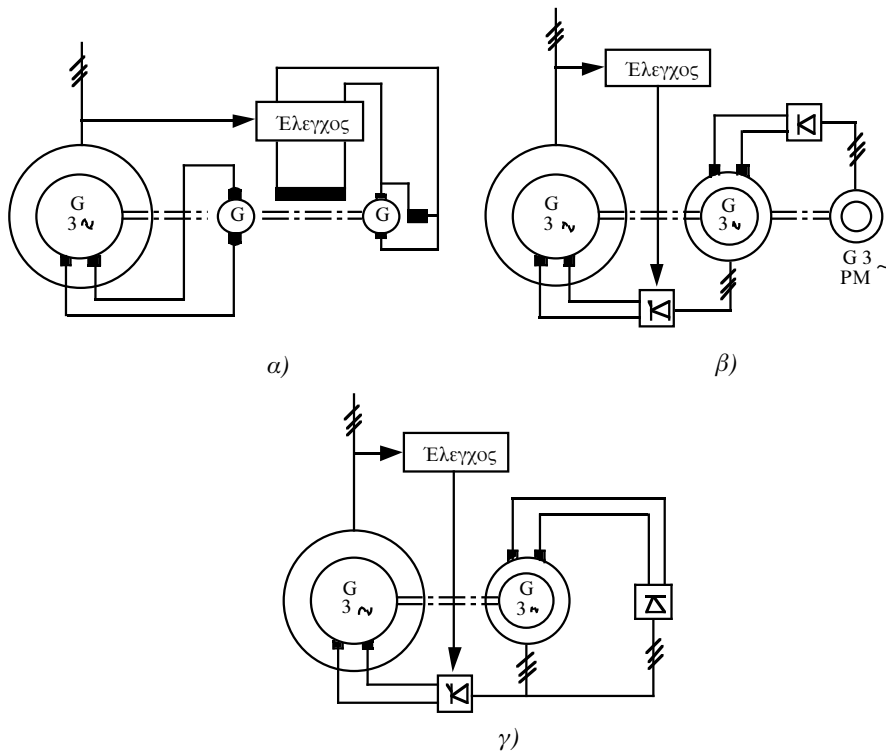
Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μεθόδων διέγερσης των ΣΜ, ανάλογα με τις απαιτήσεις ως προς την αξιοπιστία της λειτουργίας τους και την ταχύτητα απόκρισης του κυκλώματος του ελέγχου της διέγερσης σε απότομες μεταβολές. Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος π.χ. απαιτείται ταχεία μείωση της επαγόμενης στο στάτη τάσης, που επιτυγχάνεται με ταχεία μείωση της διέγερσης. Στην περίπτωση απότομης αύξησης της επαγωγικής φόρτισης, που προκαλεί πτώση τάσης, απαιτείται ταχεία αύξηση της διέγερσης για να κρατηθεί σταθερή η τάση. Για λόγους αξιοπιστίας και συντήρησης αποφεύγονται κατά το δυνατόν οι ολισθαίνουσες επαφές και κυρίως οι συλλέκτες, δηλαδή η χρήση μηχανών ΣΡ. Έτσι έχουν επικρατήσει οι μέθοδοι διέγερσης με ημιαγωγούς (τρανζίστορες, θυρίστορες) χωρίς διεγέρτριες (γεννήτριες) ή με διεγέρτριες ΣΓ.

Η ισχύς διέγερσης κυμαίνεται στα όρια 0,3 έως 5% της ονομαστικής ισχύος της ΣΓ για μεγάλες και μικρές ισχείς αντίστοιχα.

1.2.1. Διεγέρτρια στον ίδιο άξονα με τη ΣΓ

Ο άξονας της διεγέρτριας είναι συνδεδεμένος με συμπλέκτη ή με μειωτήρα με τον άξονα της ΣΓ. Η παλαιότερη και απλούστερη μέθοδος είναι η *αυτοδιεγερόμενη διεγέρτρια ΣΡ* και τελειότερή της η *διεγέρτρια ΣΡ ξένης διέγερσης* που προέρχεται από δεύτερη βοηθητική διεγέρτρια της οποίας ο δρομέας είναι και αυτός στον άξονα της ΣΓ (Σχ. 1.9α). Οι διεγέρτριες γεννήτριες ΣΡ έχουν το μειονέκτημα της μεγάλης χρονικής σταθεράς της διέγερσής των που καθιστά αδύνατες ταχείες μεταβολές της διέγερσης.

Με την *διεγέρτρια - τριφασική γεννήτρια στον ίδιο άξονα* αποφεύγεται ο συλλέκτης, υπάρχουν βέβαια οι δακτύλιοι ολίσθησης με τις ψήκτρες (Σχ. 1.9β,γ). Η διεγέρτρια διεγείρεται ή από βοηθητική διεγέρτρια, μικρή ΣΓ με πόλους μονίμων μαγνητών (PM) (Σχ. 1.9β) ή από ανορθωτή που τροφοδοτείται από την έξοδο της ΣΓ (Σχ. 1.9γ). Η απόκριση του κυκλώματος διέγερσης εδώ είναι πολύ ταχύτερη διότι ελέγχεται η γωνία εναύσεως των θυρίστορες του ανορθωτή που παρεμβάλλεται μεταξύ της τριφασικής τάσης της διεγέρτριας και της περιέλιξης διέγερσης της ΣΓ.



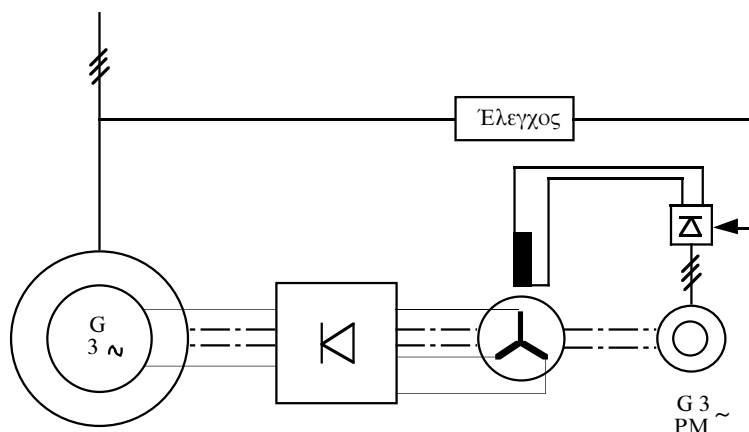
Σχήμα 1.9

Τροφοδότηση διέγερσης, μέσω δακτυλίων ολίσθησης, από διεγέρτρια με δρομέα στον άξονα της γεννήτριας

- Κύρια διεγέρτρια ΣΡ ξ.δ. και βοηθητική αυτοδευγείρομένη διεγέρτρια ΣΡ.
- Διεγέρτρια ΣΓ το ρεύμα της οποίας ανορθώνεται. Η διεγέρτρια διεγείρεται από το ανορθωμένο ρεύμα βοηθητικής διεγέρτριας (ΣΓ με πόλους μονίμων μαγνητών PM).
- Διεγέρτρια ΣΓ όπως στο (β) η οποία όμως διεγείρεται από το ανορθωμένο της τριφασικό ρεύμα.

Σε στροβιλογεννήτριες μεγάλων ισχύων για να είναι βραδύστροφη η διεγέρτρια συνδέεται στον άξονα της ΣΓ με μειωτήρα στροφών.

Με την μέθοδο της διεγέρτριας τριφασικής ΣΓ εξωτερικών πόλων (Σχ. 1.10) αποφεύγονται οι ολισθαίνουσες επαφές, επειδή η μηχανή είναι κατασκευασμένη όπως μια μηχανή ΣΡ. Οι πόλοι είναι στο στάτη, ενώ η τριφασική περιέλιξη είναι στο δρομέα και τα τρία άκρα της οδηγούνται σε ανορθωτή, ο οποίος τροφοδοτεί τη διέγερση της ΣΓ. Ο ανορθωτής που βρίσκεται στο δρομέα και συμπεριστρέφεται με αυτόν έχει διόδους ή και θυρίστος. Η διέγερση των εξωτερικών πόλων της διεγέρτριας τροφοδοτείται από βοηθη-



Σχήμα 1.10

Τροφοδοσία διέγερσης χωρίς δακτυλίους ολίσθησης από διεγέρτρια ΣΓ εξωτερικών πόλων, της οποίας το ρεύμα ανορθώνεται από περιστρεφόμενο ανορθωτή. Διέγερση της διεγέρτριας από το ανορθωμένο ρεύμα βοηθητικής διεγέρτριας (ΣΓ με πόλους μονίμων μαγνητών PM).

τική διεγέρτρια πόλων μονίμων μαγνητών (PM), το ρεύμα της οποίας ανορθώνεται.

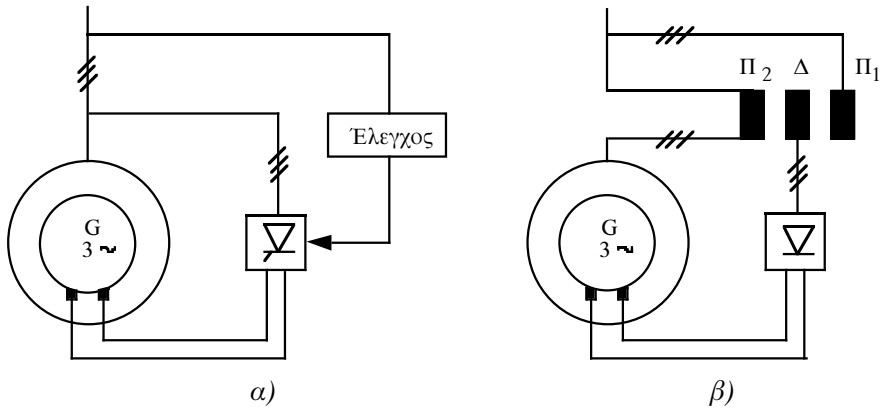
1.2.2. Ανεξάρτητη διεγέρτρια

Ο άξονάς της δεν είναι συμπλεγμένος με τον άξονα της ΣΓ αλλά με κινητήρα ο οποίος τροφοδοτείται από το τριφασικό δίκτυο.

1.2.3. Ανορθωτής χωρίς διεγέρτρια

Και εδώ η δυναμική συμπεριφορά του ελέγχου είναι άριστη, διότι ελέγχονται τα θυρίστρος του ανορθωτή (Σχ. 1.11α). Με τη μέθοδο του (Σχ. 1.11β) επιτυγχάνεται η σταθερότητα της τάσης με την αντιστάθμιση (compound) που πραγματοποιείται με ΜΣ τριών περιελίξεων.

Η πρωτεύουσα περιέλιξη Π1 επάγει στη δευτερεύουσα περιέλιξη Δ ρεύμα το οποίο ανορθωμένο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης εν κενώ I_{f0} . Η πρωτεύουσα περιέλιξη Π2 επάγει στη δευτερεύουσα περιέλιξη ρεύμα ανάλογο του ρεύματος φόρτισης $I_{fφ}$ το οποίο προστίθεται διανυσματικά στο I_{f0} . Έτσι αντισταθμίζεται η πτώση τάσης που προκαλείται από τη φόρτιση. Οι γεννήτριες με το σύστημα αυτό ονομάζονται *γεννήτριες σταθερής τάσης*.



Σχήμα 1.11

Τροφοδοσία διέγερσης μέσω δακτυλίων ολίσθησης από το ανορθωμένο ρεύμα της ΣΓ, χωρίς διεγέρτρια.

α) Χωρίς ΜΣ.

β) Αντιστάθμιση (επίτευξη σταθερής τάσης) με τη βοήθεια ΜΣ τριών περιελίξεων.