

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. — Définition et évolution de l'électrotechnique	1
1. L'électrotechnique devant le progrès actuel	1
2. Les impératifs de l'Industrie moderne automatisée	2
3. Rôle de l'ingénieur électronicien	2
4. Les voies nouvelles de l'électrotechnique	3
5. Questions de langage : terminologie et unités de mesures	4
 CHAPITRE 2. — Constitution générale d'une machine électrique : Les matériaux électrotechniques	 6
1. Généralités	6
2. Les matériaux magnétiques	7
2.1 Les tôles	7
2.2 Les fers	8
2.3 Les aimants permanents	9
2.4 Influence de la température	11
2.5 Stabilité, vieillissement des aimants	11
3. Les matériaux conducteurs	12
3.1 Généralités	12
3.2 L'effet Joule	13
3.3 Influence de la température	13
3.4 Les courants de Foucault dans les conducteurs	15
3.5 La supraconductivité	16
4. Les contacts glissants : bagues, collecteurs et balais	19
4.1 Phénomènes en jeu dans les contacts glissants	19
4.2 Propriétés et durée de vie des balais	20
4.3 Balais et contacts liquides	21
5. Les matériaux isolants	21
5.1 Différentes classes d'isolants	21
5.2 Nature complexe des isolants modernes	22
5.3 Durée de vie des isolants	23
6. Les semi-conducteurs	24
6.1 Généralités	24
6.2 L'effet Hall	24
6.3 Les magnéto-résistances	25
6.4 Les thermo- et photo-éléments	25

CHAPITRE 3. — Technologie des machines modernes	27
1. Avant-propos	27
2. La puissance massique	27
3. Miniaturisation et précision	28
4. Apports de la recherche pure et appliquée	29
5. Les circuits et bobinages « imprimés »	29
5.1 Technologie de base	30
5.2 Bobinages électrotechniques	31
5.3 Technologies diverses de bobinages « imprimés »	32
6. Paliers spéciaux	33
6.1 Les paliers « fluides »	36
6.2 Réactions magnétiques sur les paliers	36
6.3 Paliers divers sans graissage	38
7. Refroidissement des machines tournantes	38
7.1 Procédés de refroidissement	38
8. Adaptation des machines à des milieux divers	39
8.1 Le vide	39
CHAPITRE 4. — Les lois fondamentales de l'électrotechnique : magnétisme et induction	42
1. La loi de Laplace	42
1.1 Comportement d'une spire dans un champ magnétique	43
1.2 Conclusions pratiques	44
1.3 Flux orthogonaux et couple	44
1.4 Les courants de Foucault	45
1.5 Flux résultant. Nature du couple	45
2. Les lois des circuits magnétiques	46
2.1 Circuit magnétique homogène et non saturé	46
2.2 Circuit magnétique non homogène et non saturé	47
2.3 Circuits magnétiques à plusieurs branches ou dérivés	47
2.4 Circuit magnétique réel portant deux forces magnétomotrices distinctes	48
2.5 Circuits saturés	50
3. Expression générale du travail mécanique développé dans un système de courants mobiles les uns par rapport aux autres	52
4. Rappel des notions fondamentales sur les courants alternatifs à basse fréquence	54
4.1 Avant-propos	55
4.2 Fonctions périodiques ou sinusoïdales	55
4.3 Représentation vectorielle	56
4.4 Expression de la puissance	58
4.5 Tensions et courants polyphasés	58
4.6 Puissance d'un système triphasé équilibré	60
5. Etude des champs (ou flux) tournants	60
5.1 Condition nécessaire et suffisante	61
5.2 Répartition sinusoïdale des champs tournants	61

5.3	Bobinages multipolaires à $2p$ pôles	62
5.4	Résumé et conclusions de cette étude	63
5.5	Décomposition d'un flux alternatif monophasé en deux flux tournants	63
5.6	Généralisation des notions classiques de flux tournants	64
6.	Les lois de l'électrotechnique appliquées aux machines	65
6.1	Circuits magnétiques et bobinages	65
6.2	Machines à entrefer homopolaire ou hétéropolaire	66
CHAPITRE 5. — Forme fondamentale de la machine électrique		68
1.	Le bilan énergétique	68
1.1	Etude théorique	68
1.2	Application numérique	70
1.3	Valeurs maximales du couple électromagnétique	71
2.	Les lois de similitude	72
2.1	La vitesse	72
2.2	Les trois lois de similitude	72
3.	Etude des échauffements et du refroidissement	73
3.1	Généralités	73
3.2	La conductibilité thermique	74
3.3	Echauffement et refroidissement en régime transitoire	76
3.4	Conclusions pratiques	77
3.5	Les régimes « normalisés »	78
3.6	Calcul des échauffements instantanés	82
3.7	Echauffement en régime cyclique rapide	84
3.8	Conclusions de cette étude	86
3.9	Rôle très important de la commande électronique dans l'échauffement d'un servomoteur	86
4.	Les protecteurs thermiques	88
CHAPITRE 6. — Plan d'étude des diverses machines électriques tournantes		90
1.	Diversité des machines électriques	90
2.	Classement fonctionnel	90
3.	Classement théorique	91
4.	Dispositions technologiques	92
5.	Conclusions	93
CHAPITRE 7. — Etude de l'anneau Gramme et des induits en tambour		94
1.	Généralités	94
1.1	L'anneau Gramme	94
1.2	Le principe de la commutation. Rôle du collecteur	94
1.3	Principe des bobinages en tambour	95
1.4	Calcul de la force électromotrice	96
1.5	L'anneau Gramme multipolaire	97
2.	Etude des bobinages en tambour	98
2.1	Connexions entre conducteurs	98
2.2	Le collecteur et les balais. Le calage	99

2.3	Le pas de bobinage. Le pas raccourci.....	100
2.4	Schémas de bobinage.....	100
2.5	Résumé et conclusions.....	102
2.6	Variantes des bobinages en tambour : l'ondulé-série.....	102
2.7	Quel est l'intérêt des machines multipolaires ?	105
CHAPITRE 8. — Etude des induits en tambour en charge : moteurs et génératrices.		106
1.	La réaction d'induit.....	106
1.1	La réaction transversale.....	106
1.2	La réaction directe.....	106
1.3	Nature de la réluctance du circuit magnétique.....	107
1.4	Le phénomène de commutation.....	107
1.5	Bobinages auxiliaires.....	108
1.6	Conséquences de la réaction d'induit.....	108
2.	Fonctionnement en moteur ou en génératrice.....	109
2.1	Etude plus particulière du moteur : la constante K	109
2.2	Equation de la vitesse en fonction du courant (couple).....	110
2.3	Famille de courbes caractéristiques couple/vitesse ; influence de la réaction d'induit.....	112
2.4	Limites de la linéarité et stabilité de marche à différents régimes.....	113
2.5	Conclusions de cette étude.....	115
CHAPITRE 9. — Les machines synchrones : alternateurs et moteurs.....		120
1.	Généralités	120
2.	Alternateurs	121
2.1	Stators et rotors polyphasés.....	121
2.2	Bobinages polyphasés.....	122
2.3	Bobinages monophasés.....	124
2.4	Stators et rotors multipolaires	124
2.5	Bobinages complexes à spires « réparties » et à « trous partiels »	125
3.	Réaction d'induit des machines synchrones.....	127
3.1	Phase du flux de réaction.....	127
3.2	Diagramme de Fresnel.....	128
4.	Couplage en parallèle des machines synchrones	129
4.1	Conditions nécessaires.....	129
4.2	Stabilité de marche. Amortissement. Limite de décrochage.....	131
5.	Réaction d'induit des alternateurs monophasés.....	131
6.	Réluctance directe et réluctance transversale des alternateurs.....	132
7.	Les alternateurs homopolaires.....	132
7.1	Principe	132
7.2	Réalisations diverses.....	133
CHAPITRE 10. — Les dynamos modernes. Moteurs et génératrices		136
1.	Introduction	136
2.	Moteurs de construction traditionnelle	136
2.1	Micromoteurs à aimant permanent.....	136
2.2	Moteurs de petite puissance (jusqu'à 3 kW environ).....	137
2.3	Moteurs de puissance moyenne et d'usage général.....	138
2.4	Moteurs « couple »	141

3.	Types nouveaux s'écartant des formes traditionnelles.....	143
3.1	Le moteur « Minertia ».....	143
3.2	Moteurs et génératrices à « conducteurs libres ».....	146
3.3	Moteurs et génératrices « Servalco » à bobinages « imprimés »..	151
3.4	Moteurs sans fer pour champs magnétiques intenses.....	157
4.	Machines spéciales diverses.....	158
4.1	Les dynamos homopolaires.....	158
4.2	Dynamos à disques à fentes.....	159
4.3	Moteurs linéaires à courant continu et bobinage « imprimé »....	159
5.	La commutation électronique.....	161
5.1	Caractéristiques de ces moteurs.....	162
5.2	Réalisation pratique.....	162
5.3	Commutation par « magnéto-résistances ».....	163
CHAPITRE 11.	— Les machines synchrones modernes.....	165
1.	Evolution des alternateurs de petite et moyenne puissance.....	165
2.	Alternateurs hétéropolaires.....	166
2.1	Forme classique.....	166
2.2	Inducteur en cloche.....	166
2.3	A entrefer plan.....	166
3.	Alternateurs homopolaires.....	166
4.	Régulation des alternateurs.....	168
CHAPITRE 12.	— Machines diverses dérivées de la dynamo.....	169
1.	Moteur « Universel ».....	169
2.	Les commutatrices.....	171
2.1	Généralités.....	171
2.2	Fonctionnement et caractéristiques.....	172
3.	Convertisseurs continu-continu.....	173
3.1	Convertisseurs multiples.....	174
CHAPITRE 13.	— Les machines d'induction ou à champ tournant.....	175
1.	Le moteur asynchrone polyphasé.....	175
1.1	Généralités et description.....	175
1.2	Théorie simplifiée.....	176
1.3	Rendement du moteur asynchrone.....	179
2.	Le moteur asynchrone monophasé.....	181
2.1	Théorie élémentaire.....	181
2.2	Démarrage des moteurs monophasés.....	182
2.3	Moteur monophasé à démarrage par effet Hall.....	184
3.	Le moteur triphasé à collecteur.....	184
3.1	Description.....	184
3.2	Fonctionnement.....	185
3.3	Possibilité de supprimer le collecteur : le Kinastor.....	188
4.	Moteurs asynchrones divers.....	188
4.1	Moteurs monophasés à « bobine écran ».....	188
4.2	Moteur asynchrone à rotor massif.....	189

4.3	Moteur d'induction à hystérésis.....	190
4.4	Moteur asynchrone diphasé à phase de commande.....	191
4.5	Moteur asynchrone alimenté en courant continu.....	194
5.	Procédés de réglage de la vitesse des moteurs asynchrones	194
6.	Moteurs asynchrones linéaires	196
CHAPITRE 14. — Moteurs et dispositifs divers utilisés en automatique.....		199
1.	Moteurs synchrones de puissance fractionnaire	199
1.1	Généralités	199
1.2	La roue phonique.....	199
1.3	Le moteur asynchrone synchronisé.....	200
2.	Synchronisation des moteurs à courant continu.....	202
3.	Les moteurs fonctionnant en « pas à pas ».....	203
3.1	Généralités	203
3.2	Qualités requises. Différents types de moteurs.....	203
3.3	Moteurs à induit en tambour avec bagues sectoriales.....	204
3.4	Moteurs à réluctance variable.....	205
3.5	Le Stéromoteur	207
3.6	Couple sur l'arbre et erreur de positionnement des moteurs pas à pas	208
4.	Freins magnétiques et embrayages.....	208
4.1	Frein à disque.....	210
4.2	Freins et embrayages à fer tournant et à excitation variable.....	210
5.	Les convertisseurs de fréquence.....	211
5.1	Intérêt et emploi des convertisseurs de fréquence.....	211
5.2	Solutions diverses.....	211
6.	Les multiplieurs de fréquence.....	212
6.1	Principe	212
6.2	Réalisations	213
6.3	Multiplieur de fréquence à courant continu.....	213
CHAPITRE 15. — Machines et appareils de télécommande et de détection. Les capteurs électrotechniques.....		215
1.	Les génératrices tachymétriques.....	215
1.1	Principe des tachymétries à courant continu.....	215
1.2	Précision. Modulation	215
1.3	Tachymétries incorporées	216
1.4	Génératrices tachymétriques asynchrones.....	217
1.5	Génératrices tachymétriques synchrones.....	218
1.6	Capteur tachymétrique à très basse vitesse.....	219
1.7	Tachymétries à haute définition. (Optique ou magnétique).....	219
2.	Les synchro-machines	220
2.1	Historique du transmetteur.....	221
2.2	Etude théorique des transmetteurs.....	222
2.3	Les transmetteurs modernes. Technologie générale des synchro-machines	227
2.4	Le transmetteur différentiel	230
2.5	Les appareils de télécommande à courant continu.....	231
2.6	Le synchro-détecteur.....	233

2.7	Remarque sur l'alimentation des synchromachines.....	234
2.8	Le trigonomètre (transformateur de coordonnées).....	235
2.9	Synchrodécteur et trigonomètre à effet Hall.....	237
3.	Etude de certains capteurs.....	238
3.1	L'Iductosyn.....	239
3.2	La règle magnétique S. E. A. (Télécode).....	240
CHAPITRE 16. — Les machines tournantes utilisées comme amplificateur de puissance.....		242
1.	Amplification ou « gain ».....	242
2.	Principe d'une génératrice amplificatrice.....	242
3.	Qualités demandées à une génératrice amplificatrice.....	243
3.1	Le temps de réponse et la linéarité.....	243
3.2	Le facteur d'amplification.....	244
3.3	Rendement des machines amplificatrices.....	244
3.4	Influence de la vitesse.....	245
4.	Génératrice à excitation séparée : groupe Ward Leonard.....	246
4.1	Génératrice compensée à réponse rapide.....	246
4.2	Génératrice compensée « shunt » à commande d'excitation.....	248
5.	Les métadynes.....	249
5.1	Principe et caractéristiques générales.....	249
5.2	L'amplidyne.....	253
CHAPITRE 17. — Les servomoteurs en automatique.....		256
1.	Généralités sur les moteurs et leur alimentation en énergie.....	256
1.1	Le moteur considéré comme transformateur d'énergie.....	256
1.2	L'énergie sous ses différentes formes.....	256
1.3	Notions de force, couple, travail, puissance.....	258
1.4	Les différents types de moteurs : place du moteur électrique devant ses concurrents.....	258
2.	Les chaînes cinématiques.....	259
2.1	Nécessité, en général, d'organes intermédiaires entre un moteur et sa charge.....	259
2.2	Formes diverses des chaînes cinématiques.....	260
2.3	Inertie. Jeux. Homocinétisme.....	262
3.	Paramètres d'un servomoteur.....	264
3.1	Les régimes transitoires.....	264
3.2	Rappel des notions fondamentales de dynamique.....	264
3.3	Equation de la vitesse d'un servomoteur avec chaîne cinématique et charge. Valeur minimale de P_s	265
3.4	Facteurs de qualité.....	266
4.	Choix d'un servomoteur.....	269
4.1	Classement des moteurs d'après leur constante de temps mécanique totale.....	270
4.2	Remarques sur l'estimation de la constante de temps.....	271
4.3	Artifices employés pour améliorer certains servomoteurs.....	271

CHAPITRE 18. — Commande des servomoteurs. Asservissements	275
1. Avant-propos	275
2. Moteurs à courant continu commandés en pas à pas.....	275
2.1 Généralités	275
2.2 Amortissement et constante de temps.....	276
2.3 Fréquence maximale des pas et précision obtenue.....	276
3. Commande d'un moteur à courant continu par courants pulsés de durée variable	277
4. Asservissement de position par commande impulsionnelle.....	280
5. Asservissement de vitesse de haute précision.....	281
5.1 Système d'asservissement de vitesse à « phase bloquée ».....	282
CHAPITRE 19. — Unités de mesures et calculs numériques en automatique.....	292
1. Unités fondamentales et dérivées. Equations aux dimensions.....	292
2. Le système international M. K. S. A.	293
2.1 Les unités électromécaniques M. K. S. A. Rapport avec les unités anglo-saxonnes	293
2.2 Unités électromagnétiques.....	295
3. Note sur le système M. K. S. A. rationalisé	297
3.1 Application : formule donnant l'attraction magnétique.....	298
4. Quelques exemples numériques de calculs de servomécanismes.....	299
5. Moyens de mesures utilisés dans les servomécanismes.....	300
5.1 Mesure des couples utiles sur l'arbre.....	300
5.2 Mesure des vitesses et des accélérations.....	301
5.3 Mesure des températures et des échauffements.....	301
6. Calcul d'un aimant.....	302
6.1 Principe	302
6.2 Aimant localisé dans le circuit magnétique.....	302
6.3 Variations de l'induction à l'intérieur même de l'aimant	303
6.4 Conséquences pratiques.....	304
6.5 Aimantation et stabilisation des aimants	304
7. Calcul des bobinages.....	305
7.1 Bobine inductrice alimentée en courant continu.....	305
7.2 Différentes formes de bobinages	306
7.3 Méthode de calcul. Estimation des pertes.....	307
7.4 Bobines et noyaux magnétiques en alternatif.....	308
INDEX ALPHABÉTIQUE	309