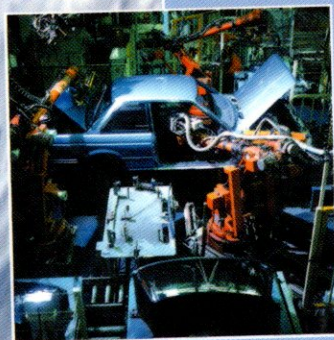
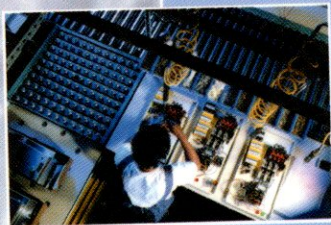


Guy Séguier | Francis Notelet

Électrotechnique industrielle

3^e édition



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Table des matières

Préface

III

Partie 1

Machines à courant continu

Chapitre 1

Construction. Principe

3

1. Description 3
2. Calcul du couple et de la f.e.m. 5
 - 2.1. Couple électromagnétique. Couple utile du moteur 5
 - 2.2. Force électromotrice 6
3. Relations générales du moteur à courant continu 6
 - 3.1. Équation des tensions. Vitesse 7
 - 3.2. Pertes et rendement 8
 - 3.3. Réversibilité 8

Chapitre 2

Création du flux. Étude de l'inducteur

11

1. Le circuit magnétique 11
 - 1.1. Remarques préliminaires 11
 - 1.2. Les éléments du circuit magnétique 11
2. Calcul de la caractéristique magnétique 12
 - 2.1. Principe du calcul de la f.m.m. 12
 - 2.2. Notes sur les ampères-tours consommés par les divers éléments 14
 - 2.3. Le flux de fuites 19

2.4. Caractéristiques magnétiques partielles, totale	20
3. Calcul d'une bobine inductrice	22
3.1. Cas d'une bobine alimentée par une tension	22
3.2. Cas d'une bobine alimentée par un courant	23

Annexe

Les aimants permanents.

Leur utilisation dans la machine à courant continu

A.1. Introduction. Classification des matériaux	24
A.1.1. Champ, induction, perméabilité, susceptibilité magnétiques	24
A.1.2. Classification des corps au point de vue magnétique	25
A.2. Propriétés des aimants	25
A.2.1. Courbe de première aimantation	25
A.2.2. Cycle d'hystérésis	27
A.2.3. Droite de recul	28
A.3. Fonctionnement statique d'un aimant. Exemple simple	29
A.3.1. Caractéristique externe d'un aimant	29
A.3.2. Critère d'Evershed	30
A.4. Fonctionnement dynamique d'un aimant	31
A.4.1. Cas d'une variation de perméance d'entrefer	31
A.4.2. Cas de l'apparition d'un champ extérieur	33
A.5. Matériaux constitutifs des aimants permanents	35
A.5.1. Les aciers martensitiques	35
A.5.2. Les alnico	35
A.5.3. Les ferrites	36
A.5.4. Les composés métaux-terres rares	36
A.6. Utilisation des aimants dans les machines à courant continu	36

Chapitre 3

Utilisation du flux : l'induit, le collecteur

1. Réalisation du bobinage de l'induit	39
1.1. Les sections	39
1.2. Le collecteur	42
1.3. Mise en série des sections	42
1.4. Exemple simple	43
1.5. Remarques pratiques	45
2. La réaction d'induit	46
2.1. Le phénomène	46
2.2. Les effets de la réaction d'induit	47
2.3. L'enroulement de compensation	49
3. La commutation	50
3.1. Le phénomène	50
3.2. Ce qui freine et ce qui accélère l'inversion	52
3.3. La tension de réactance	53
3.4. Les pôles auxiliaires de commutation	54

Annexe

Calcul direct de la f.e.m

A.1. Remarque sur les relations $f = BIL$ et $e = BLv$	57
A.2. F.e.m. induite dans une section	57
A.3. F.e.m. totale	59

Chapitre 4

Caractéristiques lors du fonctionnement en génératrice entraînée à vitesse constante

1. Remarques préliminaires	61
2. Génératrice à excitation séparée	62
2.1. Caractéristique à vide	62
2.2. Caractéristiques en charge	64
3. Génératrice à excitation parallèle	65
3.1. Amorçage. Caractéristique à vide	66
3.2. Caractéristiques en charge	67
4. Génératrice à excitation série	68
4.1. Caractéristique en charge	68
4.2. Réglage du courant en charge	69
5. Génératrices à excitation composée	70
5.1. Génératrice à excitation composée	70
5.2. Augmentation du gain en puissance. Rototrol	70

Chapitre 5

Caractéristiques lors du fonctionnement en moteur alimenté sous tension constante

1. Remarques préliminaires	73
1.1. Caractéristiques usuelles d'un moteur	74
1.2. Le point de fonctionnement	74
2. Moteur à excitation parallèle alimenté sous tension constante	75
2.1. Caractéristiques en fonctionnement normal	75
2.2. Démarrage	79
2.3. Freinage électrique	82
2.4. Remarque sur les moteurs à aimants permanents	84
3. Moteur à excitation série alimenté sous tension constante	84
3.1. Caractéristiques sans shuntage de l'inducteur	85
3.2. Shuntage de l'inducteur	88
3.3. Démarrage	88
3.4. Freinage	89
3.5. Compoundage du moteur shunt	90

Caractéristiques lors du fonctionnement en moteur alimenté sous tension variable

1. Moteur à excitation séparée alimenté sous tension variable
 - 1.1. Caractéristiques en moteur à excitation constante 93
 - 1.2. Simplification des caractéristiques 93
 - 1.3. Les trajets possibles du point de fonctionnement 96
 - 1.4. Marche à « puissance constante » 98
 - 1.5. Notes sur la réalisation de la tension variable 103
2. Moteur à excitation série alimenté sous tension variable
 - 2.1. Caractéristiques sans shuntage de l'inducteur 109
 - 2.2. Shuntage de l'inducteur. Les zones de fonctionnement possible 109
 - 2.3. Démarrage. Modification de la vitesse. Freinage 110
 - 2.4. Notes sur la réalisation de la tension variable 111

Chapitre 7

Essais du moteur à courant continu

1. Essais directs en charge
 - 1.1. Frein électrique. La dynamo-frein 115
 - 1.2. Freins mécaniques 115
 - 1.3. Freins magnétiques 117
2. Méthodes d'opposition
 - 2.1. Méthode d'Hopkinson 118
 - 2.2. Méthode de Rayleigh et Kapp 119
 - 2.3. Méthode de Blondel 120
 - 2.4. Méthode d'Hutchinson 121
3. Détermination des caractéristiques en charge à partir d'essais à puissance réduite
 - 3.1. Essais à puissance réduite en génératrice. Utilisations 124
 - 3.2. Essai en moteur à vide. Utilisations 124

Annexe

Pertes normales. Pertes supplémentaires

- A.1. Les pertes normales
 - A.1.1. Pertes Joule dans le circuit de l'induit 132
 - A.1.2. Pertes par excitation 132
 - A.1.3. Pertes normales dans le fer 133
 - A.1.4. Pertes mécaniques 133
- A.2. Les pertes supplémentaires
 - A.2.1. Les pertes supplémentaires à vide 134
 - A.2.2. Les pertes supplémentaires en charge 134
- A.3. Remarques sur le rendement 135

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

Partie 2

Rappels sur les courants alternatifs monophasés et triphasés

Chapitre 1

Courants monophasés

1. Valeur et représentations d'une grandeur sinusoïdale
 - 1.1. Grandeur périodique, alternative, sinusoïdale 141
 - 1.2. Valeur efficace 141
 - 1.3. Représentation vectorielle. Notation complexe 142
 - 1.4. Propriétés des grandeurs sinusoïdales 144
2. Impédances 145
3. Puissances
 - 3.1. Définitions. Expressions. Unités 146
 - 3.2. Signification de la puissance réactive 146
 - 3.3. Propriété importante : conservation de la puissance active et de la puissance réactive 147
4. Méthodes usuelles d'études des circuits
 - 4.1. Exemple 1 : chute de tension dans une ligne 148
 - 4.2. Exemple 2 : dérivations échelonnées le long d'une ligne résistante et inductive 151

Annexe

Les inductances des circuits couplés

- A.1. Les divers flux 155
- A.2. Les diverses inductances. Les coefficients de couplage, de dispersion 157
- A.3. La notion d'inductance dans les circuits saturés
 - A.3.1. Circuits magnétiques avec entrefer 158
 - A.3.2. Circuits magnétiques sans entrefer 158

Chapitre 2

Courants triphasés. Étude des systèmes équilibrés

1. Introduction 161
 - 1.1. Définitions 161
 - 1.2. Propriété fondamentale 162
 - 1.3. Opérateur rotation 162
2. Couplage des trois phases 163
 - 2.1. Couplage en étoile 163
 - 2.2. Couplage en triangle 165
3. Schéma monophasé équivalent 167
 - 3.1. Cas où les circuits des trois phases ne sont pas couplés 167

Transformateurs

- 3.2. Cas où les circuits des trois phases sont couplés, Grandeurs cycliques 170
- 4. Puissances 172
 - 4.1. Définitions: Expressions 172
 - 4.2. Propriété importante 172
 - 4.3. Remarques sur la mesure de la puissance par la méthode des deux wattmètres 173
- 5. Étude des circuits triphasés 176
 - 5.1. Règles générales 176
 - 5.2. Remarques pratiques 177

Annexe

Autres systèmes polyphasés

- A.1. Système diphasé 179
- A.2. Systèmes de somme nulle 180

Chapitre 3

Courants triphasés. Étude des systèmes déséquilibrés

- 1. Les composantes symétriques 183
 - 1.1. Définition des composantes 183
 - 1.2. Détermination des composantes 184
 - 1.3. Mesure des composantes 188
 - 1.4. Relations entre les composantes des deux systèmes de tensions, des deux systèmes de courants 192
- 2. Utilisation des composantes symétriques 193
 - 2.1. Conduite des calculs 193
 - 2.2. Remarques sur les impédances 194
 - 2.3. Exemple simple 194

Annexe

Les harmoniques

- A.1. Valeur et classification des harmoniques 198
 - A.1.1. Valeur des harmoniques 198
 - A.1.2. Classification des harmoniques en triphasé 200
- A.2. Génération et propagation des harmoniques dans les réseaux triphasés 201
 - A.2.1. Source siège de f.e.m. non sinusoïdales 201
 - A.2.2. Propagation des harmoniques dus à des f.e.m. non sinusoïdales 202
 - A.2.3. Les générateurs de courants harmoniques 203
 - A.2.4. Propagation des harmoniques dus à des récepteurs non linéaires 203

Chapitre 1

Preliminaires : circuits magnetiques des transformateurs. Bobines à noyau de fer

- 1. Circuits magnetiques et bobines monophasés 207
 - 1.1. Construction 207
 - 1.2. Forme d'onde du courant absorbé par une bobine sans entrefer 210
 - 1.3. Courant sinusoïdal équivalent. Inductance équivalente 212
 - 1.4. Rôle des entrefers 213
- 2. Circuits magnetiques et bobines triphasés 214
 - 2.1. Groupement de bobines monophasées 214
 - 2.2. Circuit magnetique triphasé usuel 215
 - 2.3. Autres circuits magnetiques triphasés 216

Chapitre 2

Le transformateur monophasé

- 1. Constitution 219
 - 2. Fonctionnement. Schémas équivalents 220
 - 2.1. Fonctionnement à vide. Rapport des tensions 220
 - 2.2. Fonctionnement en charge. Rapport des courants 221
 - 2.3. Chute de tension en charge. Schémas équivalents 222
 - 2.4. Détermination des éléments du schéma équivalent 226
- 3. Caractéristiques 227
 - 3.1. Chute de tension secondaire 227
 - 3.2. Rendement 229

Annexe A

Calcul des inductances de fuites

- A.1. Enroulements concentriques simples 231
- A.2. Enroulements concentriques doubles 235
- A.3. Enroulements alternés 236

Annexe B

Régime transitoire à la mise sous tension

Chapitre 3

Le transformateur triphasé

- 1. Constitution 239
 - 1.1. Le circuit magnetique 239

2.	Fonctionnement en régime équilibré	244
2.1.	Schéma monophasé équivalent	244
2.2.	Détermination des éléments du schéma équivalent	245
2.3.	Caractéristiques	247
3.	Fonctionnement en régime déséquilibré	247
3.1.	Schéma équivalent pour les systèmes direct et inverse	248
3.2.	Schéma équivalent pour le système homopolaire	249
3.3.	Exemple de transfert du déséquilibre des courants	252
3.4.	Déséquilibre des tensions dû au déséquilibre des courants	253
4.	Fonctionnement en parallèle des transformateurs	256
4.1.	Conditions de mise en parallèle	256
4.2.	Transformateur unique équivalent. Courant de circulation	258

Chapitre 4

Les transformateurs spéciaux

1.	L'autotransformateur	261
1.1.	L'autotransformateur monophasé	261
1.2.	Avantages et inconvénient de l'autotransformateur	263
1.3.	Schémas en triphasé	264
1.4.	Utilisations	264
1.5.	Notes sur les dispositifs de réglage en charge	265
2.	Le transformateur série	267
2.1.	Principe	267
2.2.	Étude de l'écart entre \bar{I}_1 et $n_2 \bar{I}_2 / n_1$	267
2.3.	Utilisation	268
2.4.	Remarques pratiques	269
3.	Le transformateur à plusieurs secondaires	269
3.1.	Schéma monophasé équivalent	270
3.2.	Utilisation du schéma équivalent	271
4.	Les transformateurs changeant le nombre de phases	271
4.1.	Transformateur triphasé-diphasé	271
4.2.	Passage du triphasé à un nombre de phases multiple de trois	274

Partie 4

Champs tournants. Procédés généraux d'étude des machines à courant alternatif

Chapitre 1		
Création des champs tournants		279
1.	Bobinage triphasé. Représentations	279

1.2.	Représentations du bobinage	280
1.3.	Multiplication du nombre d'encoches	282
2.	Force magnétomotrice d'une phase	282
2.1.	Pourquoi la f.m.m. et non l'induction ?	282
2.2.	La f.m.m. représentée	282
2.3.	Effets de la multiplication du nombre d'encoches	284
3.	Champ tournant bipolaire	284
3.1.	Expression de la f.m.m. résultante	284
3.2.	Nature de l'onde résultante. Représentation-	284
4.	Champ tournant multipolaire	284
4.1.	Réalisation	284
4.2.	La f.m.m. résultante. La vitesse synchrone	284
5.	Cas des machines monophasées	29

Annexe

Champs tournants elliptiques.

Champs tournants harmoniques

A.1.	Champ tournant elliptique	29
A.1.1.	Effets des trois composantes	29
A.1.2.	Représentation de l'onde résultante	29
A.1.3.	Remarque sur l'enroulement monophasé	29
A.2.	Champs tournants harmoniques	29
A.2.1.	Cas des répartitions non sinusoïdales	29
A.2.2.	Cas des courants non sinusoïdaux	29
A.2.3.	Cas des courants non sinusoïdaux et d'une répartition non sinusoïdale	29

Chapitre 2

Enroulements des machines à courant alternatif

1.	Enroulements triphasés à une couche	29
1.1.	Caractérisation. Schéma de bobinage	29
1.2.	Notes sur la réalisation	30
1.3.	Le coefficient de bobinage	30
2.	Enroulements triphasés à deux couches	30
2.1.	Enroulement à pas diamétral	30
2.2.	Enroulement à pas raccourci	30
3.	Enroulements monophasés	30

Chapitre 3

Procédés mathématiques d'étude des machines à courant alternatif

1.	Les inductances des enroulements	30
----	----------------------------------	----

1.1. Cas des machines à rotor lisse	311
1.2. Cas des machines à pôles saillants	314
2. Expression générale du couple électromagnétique	319
2.1. Remarques préliminaires	319
2.2. Systèmes électromagnétiques à simple excitation	320
2.3. Systèmes électromagnétiques à double excitation. Généralisation	323
3. Généralités sur les transformations	325
3.1. Introduction	325
3.2. Exemples de composantes symétriques	327
3.3. Les composantes relatives	330

Partie 5

Machines synchrones

Chapitre 1	
Construction. Principe. Caractéristiques	337
1. Construction, Principe	337
1.1. Construction	337
1.2. Principe	339

2. Diagramme à réactance synchrone. Caractéristiques	341
2.1. Le diagramme à réactance synchrone	341
2.2. Caractéristiques d'un alternateur isolé	343
2.3. Caractéristiques d'un alternateur relié à un réseau puissant	344

Annexe

Étude de la f.e.m. créée par l'inducteur

A.1. Cas de la répartition sinusoïdale du flux inducteur	350
A.1.1. F.e.m. induite dans une section	350
A.1.2. F.e.m. par phase	351
A.2. Cas de la répartition non sinusoïdale du flux inducteur	352
A.2.1. F.e.m. induite dans une section	352
A.2.2. F.e.m. par phase	353
A.3. Caractéristique magnétique	354
A.4. Notes sur les harmoniques de denture	354

Chapitre 2

Réaction d'induit. Diagrammes

1. Cas des alternateurs à rotor lisse	357
1.1. Réaction d'induit	357

1.2. Diagramme à réactance synchrone	361
1.3. Diagramme de Potier	362
2. Cas des alternateurs à pôles saillants	365
2.1. Réaction d'induit	365
2.2. Diagramme à deux réactances synchrones	368
2.3. Diagramme de Blondel	370
3. Remarques sur les diagrammes	372
3.1. Causes de l'écart sur le courant d'excitation	372
3.2. Notes sur l'autoamorçage de l'alternateur	372

Annexe A

Particularités des machines à pôles saillants

A.1. Expression de l'angle interne. Conséquences	375
A.2. Lecture de P et Q. Courbes d'égal E_j/V	377

Annexe B

Cas des alternateurs monophasés

B.1. Réaction d'induit	380
B.2. Rôle des amortisseurs	381
B.3. Les amortisseurs dans les alternateurs triphasés	381

Annexe C

Alternateurs triphasés en régime déséquilibré

C.1. Réactances relatives aux trois composantes	383
C.2. Mesure de X_1 et X_0	384

Chapitre 3

Couplage et marche en parallèle des machines synchrones. Le moteur synchrone

1. Couplage d'un alternateur au réseau	387
1.1. Le couplage	387
1.2. La puissance synchronisante	388
2. Fonctionnement d'un alternateur couplé au réseau	390
3. Le moteur synchrone	391
3.1. Principe. Position du point de fonctionnement	391
3.2. Courbes en V	392
3.3. Limite de stabilité statique	393
3.4. Notes sur l'utilisation en compensateur synchrone	393
3.5. Démarrage et couplage au réseau du moteur synchrone	394

Le moteur synchrone alimenté à fréquence variable

- A.1. Le moteur à courant continu : moteur synchrone à fréquence variable 396
- A.2. Le moteur synchrone autopiloté 396
 - A.2.1. Schéma d'ensemble. Principe 396
 - A.2.2. Commutations. Condition d'auto-commutation 398
 - A.2.3. Le problème du démarrage 399
- A.3. Moteur synchrone alimenté par un onduleur de tension 400
 - A.3.1. Schéma. Principe. La modulation de largeur d'impulsions 400
 - A.3.2. Réversibilité. Commande 401

Chapitre 4

La machine synchrone en régime transitoire

- 1. Modèle mathématique de la machine 403
 - 1.1. Modélisation des amortisseurs 403
 - 1.2. Machine synchrone idéalisée. Équations générales 405
- 2. Transformation de Park. Simplifications 408
 - 2.1. Équations simplifiées des tensions 408
 - 2.2. Mise en évidence des flux 409
 - 2.3. Expression simplifiée du couple 410
- 3. Impédances opérationnelles. Constantes de temps. Réactances 410
 - 3.1. Impédances opérationnelles suivant les deux axes 411
 - 3.2. Mise en évidence des flux. Couple 412
 - 3.3. Constantes de temps 412
 - 3.4. Réactances 414
- 4. Exemples 417
 - 4.1. Remarque préliminaire sur les conventions de signes 417
 - 4.2. Établissement de la tension à vide d'un alternateur 418
 - 4.3. Court-circuit triphasé d'un alternateur à vide 419

Chapitre 5

Notes sur les moteurs à réluctance variable

- 1. Les divers types de moteurs à réluctance variable 423
 - 1.1. Moteurs à circuit magnétique simple 424
 - 1.2. Moteurs à circuit magnétique multiple 425
 - 1.3. Les deux grands domaines d'utilisation 426
- 2. Étude du couple 427
 - 2.1. Notations. Relations préliminaires 427
 - 2.2. Couple créé par une phase 429
 - 2.3. Couple total 433
- 3. Alimentation du moteur 435
 - 3.1. Schéma utilisé 435
 - 3.2. Les deux modes de fonctionnement 436

Machines asynchrones

Chapitre 1

Construction. Principe. Schémas équivalents du moteur asynchrone triphasé

- 1. Construction 441
 - 1.1. Disposition générale 441
 - 1.2. Les deux types de rotors 442
- 2. Principe 443
 - 2.1. Le glissement 443
 - 2.2. Fréquence rotorique 444
 - 2.3. Effets des courants rotoriques. Couple. Flux résultant 444
- 3. Schémas équivalents 445
 - 3.1. Mise en équations 445
 - 3.2. Transformateur et schémas équivalents 446
 - 3.3. Identification des éléments du schéma simplifié 448

Chapitre 2

Le moteur asynchrone alimenté à tension et fréquence constantes

- 1. Caractéristiques 451
 - 1.1. Relations entre les puissances et les couples 451
 - 1.2. Étude d'un point de fonctionnement 453
 - 1.3. Allure des caractéristiques 454
 - 1.4. Caractéristique mécanique 455
- 2. Le diagramme circulaire des courants 458
 - 2.1. Établissement du diagramme 459
 - 2.2. Lecture des puissances. Représentation des pertes 460
 - 2.3. Échelle des glissements 463
- 3. Notes sur la détermination des caractéristiques 465
 - 3.1. Essai en charge avec mesure du couple utile 465
 - 3.2. Essai en charge sans mesure du couple utile 467
 - 3.3. Détermination des caractéristiques à l'aide du diagramme circulaire 467
- 4. Démarrage 469
 - 4.1. Démarrage par rhéostat secondaire 470
 - 4.2. Démarrage par réduction de la tension d'alimentation 473
 - 4.3. Le moteur à double cage 476
- 5. Freinage. Fonctionnement en génératrice 479
 - 5.1. Freinage par inversion du sens du flux tournant 479
 - 5.2. Freinage par courants de Foucault 481
 - 5.3. Génératrice asynchrone 482

Tracé plus précis du diagramme circulaire

- A.1. Diagramme des impédances 485
- A.2. Diagramme des courants 486
- A.3. Construction et utilisation du diagramme corrigé 488

Annexe B

Effets des harmoniques d'espace et du déséquilibre des courants

- B.1. Effets des harmoniques d'espace 489
- B.2. Le phénomène de Gorges 490
- B.3. Fonctionnement en régime déséquilibré 491

Chapitre 3

Variation de la vitesse du moteur asynchrone

- 1. Action sur le glissement 493
 - 1.1. Variation de la valeur de la tension d'alimentation 493
 - 1.2. Variation de la résistance secondaire 495
 - 1.3. Récupération de la puissance de glissement 497
- 2. Variation de la fréquence d'alimentation 500
 - 2.1. Caractéristiques à flux constant 500
 - 2.2. Cycloconvertisseurs 503
 - 2.3. Onduleurs de courant 505
 - 2.4. Onduleurs de tension 508

Annexe

Changement du nombre de pôles

- A.1. Moteurs à deux vitesses synchrones 512
- A.2. Montage en cascade de deux moteurs 513
 - A.2.1. Calcul de la vitesse synchrone du groupe 514
 - A.2.2. Calcul du partage de la puissance 515

Chapitre 4

La machine asynchrone en régime transitoire

- 1. Modèle mathématique de la machine 517
 - 1.1. Hypothèses 517
 - 1.2. Équations générales de la machine idéalisée 518
- 2. Transformation de Park. Application 519
 - 2.1. Forme générale des équations transformées 520
 - 2.2. Conditions de simplification 522
 - 2.3. Mise en évidence des flux. Expressions du couple 524
 - 2.4. Principe de la commande vectorielle 526

- 3.1. Forme générale des équations transformées 528
- 3.2. Conditions de simplification 529
- 3.3. Expression du couple 531
- 3.4. Impédances opérationnelles. Schémas équivalents 531
- 3.5. Application aux régimes transitoires de la machine asynchrone reliée au réseau 534

Chapitre 5

Moteur asynchrone monophasé

- 1. Principe 541
- 2. Diagramme de fonctionnement 541
 - 2.1. Courant et tensions des moteurs fctifs 542
 - 2.2. Le cercle construit et son utilisation 543
- 3. Caractéristiques 544
- 4. Démarrage 545
- 5. Utilisation 547

Annexe

Moteur monophasé série à collecteur

- A.1. Effet d'un champ alternatif sur un induit à collecteur 548
 - A.1.1. Fe.m. induite par spire 549
 - A.1.2. Fe.m. entre balais 549
- A.2. Description du moteur série. Principe. Conséquences 550
- A.3. Diagramme. Caractéristiques 551

Index