

Table des matières

Préface

Partie 1

Machines à courant continu

Chapitre 1

Construction. Principe

- | | |
|---|---|
| 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

- | | |
|--|----|
| 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

Calcul direct de la f.e.m 57

- 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 61

- 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 73

- 1. Remarques préliminaires 74
 - 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

Chapitre 6

Caractéristiques lors du fonctionnement en moteur alimenté sous tension variable

1. Moteur à excitation séparée alimenté sous tension variable	93
1.1. Caractéristiques en moteur à excitation constante	93
1.2. Simplification des caractéristiques	96
1.3. Les trajets possibles du point de fonctionnement	98
1.4. Marche à « puissance constante ». Les zones de fonctionnement possible	103
1.5. Notes sur la réalisation de la tension variable	104
2. Moteur à excitation série alimenté sous tension variable	109
2.1. Caractéristiques sans shuntage de l'inducteur	109
2.2. Shuntage de l'inducteur. Les zones de fonctionnement possible	110
2.3. Démarrage. Modification de la vitesse. Freinage	111
2.4. Notes sur la réalisation de la tension variable	112

Chapitre 7

Essais du moteur à courant continu

1. Essais directs en charge	115
1.1. Frein électrique. La dynamo-frein	115
1.2. Freins mécaniques	117
1.3. Freins magnétiques	117
2. Méthodes d'opposition	118
2.1. Méthode d'Hopkinson	119
2.2. Méthode de Rayleigh et Kapp	120
2.3. Méthode de Blondel	121
2.4. Méthode d'Hutchinson	122
3. Détermination des caractéristiques en charge à partir d'essais à puissance réduite	124
3.1. Essais à puissance réduite en génératrice. Utilisations	124
3.2. Essai en moteur à vide. Utilisations	129

Annexe

Pertes normales. Pertes supplémentaires

A.1. Les pertes normales	132
A.1.1. Pertes Joule dans le circuit de l'induit	132
A.1.2. Pertes par excitation	133
A.1.3. Pertes normales dans le fer	133
A.1.4. Pertes mécaniques	133
A.2. Les pertes supplémentaires	134
A.2.1. Les pertes supplémentaires à vide	134
A.2.2. Les pertes supplémentaires en charge	135
A.3. Remarques sur le rendement	136

Partie 2

Rappels sur les courants alternatifs monophasés et triphasés

Chapitre 1

Courants monophasés

1. Valeur et représentations d'une grandeur sinusoïdale	141
1.1. Grandeur périodique, alternative, sinusoïdale	141
1.2. Valeur efficace	142
1.3. Représentation vectorielle. Notation complexe	142
1.4. Propriétés des grandeurs sinusoïdales	144
2. Impédances	145
3. Puissances	146
3.1. Définitions. Expressions. Unités	146
3.2. Signification de la puissance réactive	147
3.3. Propriété importante : conservation de la puissance active et de la puissance réactive	148
4. Méthodes usuelles d'études des circuits	151
4.1. Exemple 1 : chute de tension dans une ligne	151
4.2. Exemple 2 : dérivations échelonnées le long d'une ligne résistante et inductive	153

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	158
A.3.1. Circuits magnétiques avec entrefer	158
A.3.2. Circuits magnétiques sans entrefer	159

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

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

Chapitre 3

Courants triphasés. Étude des systèmes déséquilibrés	183
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	198
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

Partie 3

Transformateurs

Chapitre 1

Préliminaires : circuits magnétiques des transformateurs.

Bobines à noyau de fer

207

1. Circuits magnétiques 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 magnétiques et bobines triphasés 214
 - 2.1. Groupement de bobines monophasées 214
 - 2.2. Circuit magnétique triphasé usuel 215
 - 2.3. Autres circuits magnétiques triphasés 216

Chapitre 2

Le transformateur monophasé

219

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

231

- 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

237

Chapitre 3

Le transformateur triphasé

239

1. Constitution 239
 - 1.1. Le circuit magnétique 239

1.2. Le couplage des enroulements	240
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 261

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. Transformation 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

1.1. Le bobinage le plus simple	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	283
2.3. Effets de la multiplication du nombre d'encoches	284
3. Champ tournant bipolaire	285
3.1. Expression de la f.m.m. résultante	285
3.2. Nature de l'onde résultante. Représentation-	286
4. Champ tournant multipolaire	288
4.1. Réalisation	288
4.2. La f.m.m. résultante. La vitesse synchrone	289
5. Cas des machines monophasées	291

Annexe

Champs tournants elliptiques.

Champs tournants harmoniques

A.1. Champ tournant elliptique	292
A.1.1. Effets des trois composantes	292
A.1.2. Représentation de l'onde résultante	293
A.1.3. Remarque sur l'enroulement monophasé	294
A.2. Champs tournants harmoniques	295
A.2.1. Cas des répartitions non sinusoïdales	295
A.2.2. Cas des courants non sinusoïdaux	296
A.2.3. Cas des courants non sinusoïdaux et d'une répartition non sinusoïdale	297

Chapitre 2

Enroulements des machines à courant alternatif

1. Enroulements triphasés à une couche	299
1.1. Caractérisation. Schéma de bobinage	299
1.2. Notes sur la réalisation	300
1.3. Le coefficient de bobinage	303
2. Enroulements triphasés à deux couches	306
2.1. Enroulement à pas diamétral	306
2.2. Enroulement à pas raccourci	307
3. Enroulements monophasés	308

Chapitre 3

Procédés mathématiques d'étude des machines à courant alternatif

1. Les inductances des enroulements	311
-------------------------------------	-----

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	350
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	357
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	375
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	380
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	383
C.1. Réactances relatives aux trois composantes	383
C.2. Mesure de X_i et X_0	384

Chapitre 3

Couplage et marche en parallèle des machines synchrones. Le moteur synchrone	387
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	396
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	403
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	423
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

Partie 6

Machines asynchrones

Chapitre 1

Construction. Principe. Schémas équivalents du moteur asynchrone triphasé

	441
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

	451
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

Annexe A

Tracé plus précis du diagramme circulaire 485

- 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 489

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

Chapitre 3

Variation de la vitesse du moteur asynchrone 493

- 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 512

- 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 517

- 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. Transformation de Ku. Application	528
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 541

1. Principe	541
2. Diagramme de fonctionnement	541
2.1. Courant et tensions des moteurs fictifs	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 548

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

Index 553