

Entraînements électriques 2

machines électriques industrielles

Robert Perret
Albert Foggia
Elisabeth Rullière
Pascal Tixador

ECT64 | VOL. 2



36418

②

Entraînements électriques 2

machines électriques industrielles

Robert Perret
Albert Foggia
Elisabeth Rullière
Pascal Tixador

Hermès
Science
— publications —

Lavoisier

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	11
Robert PERRET	
Chapitre 1. Principe des machines électriques à champ tournant	15
1.1. Description des machines à courant alternatif	16
1.2. Enroulement monophasé	18
1.2.1. Bobine diamétrale	18
1.2.2. Enroulement réparti à q bobines	22
1.2.3. Application au coefficient de raccourcissement	26
1.2.4. Machine monophasée à 2p pôles	27
1.2.5. Conclusion	29
1.3. Machine triphasée (polyphasée)	31
1.3.1. Définitions	31
1.3.2. Répartition des f.m.m.	31
1.3.3. F.m.m. harmoniques	35
1.3.4. Enroulements triphasés à une couche	36
1.3.5. Enroulement triphasé à deux couches	38
1.4. Inductances et mutuelles	40
1.4.1. Rappels	40
1.4.1.1. Inductance propre d'une bobine	43
1.4.1.2. Inductances mutuelles.	44
1.4.1.3. Inductances de fuites.	45

1.4.2. Inductances du stator des machines triphasées.	47
1.4.2.1. Cas d'une machine à entrefer régulier.	47
1.4.2.2. Cas d'une machine à entrefer variable.	52
1.4.2.3. Mesures des inductances cycliques.	56
1.4.2.4. Conclusion.	57
1.4.3. Mutuelle inductance entre une bobine du stator et une bobine du rotor	58
1.4.3.1. Cas des machines à entrefer régulier.	58
1.4.3.2. Cas des machines à entrefer variable.	59
1.4.3.3. Mesure de M_{SR}	59
1.5. Conclusion.	60
Exercice 1.1. Champ tournant statorique	61
Exercice 1.2. Bobinages triphasés	71
Exercice 1.3. Calcul d'inductances	79
Exercice 1.4. Enroulement concentré	91
Chapitre 2. Machines asynchrones triphasées	105
2.1. Description générale	105
2.2. Principe de fonctionnement	108
2.2.1. Fonctionnements comme moteur, génératrice ou frein.	108
2.2.2. Fonctionnements comme régulateur à induction.	111
2.3. Constituants	112
2.3.1. Stator.	112
2.3.2. Rotor.	113
2.3.2.1. Rotor à cage.	114
2.3.2.2. Rotor bobiné.	117
2.3.2.3. Rotor massif.	118
2.4. Modélisation vectorielle de la machine asynchrone	118
2.4.1. Hypothèses	119
2.4.2. Modélisation du stator.	119
2.4.3. Modélisation du rotor à cage d'écureuil rotorique.	119
2.4.3.1. Détermination du flux vectoriel dans le repère S.	121
2.4.3.2. Equations du rotor.	121
2.4.4. Equations de la machine dans le repère statorique.	122
2.4.5. Equations de la machine symétrisées dans le repère statorique S . .	123
2.4.6. Schéma équivalent dans le repère statorique.	124

2.4.7. Equations du moteur dans le repère T(dq) tournant à la vitesse	de synchronisme ω_s (angles électriques).	127
2.4.8. Calcul du couple.		128
2.5. Machine asynchrone en régime permanent et alimentation	en tensions triphasées, équilibrées, sinusoïdales.	129
2.5.1. Schéma équivalent en régime permanent.		129
2.5.2. Identification du schéma équivalent à partir des mesures.		131
2.5.2.1. Essai à vide.		131
2.5.2.2. Essai rotor bloqué.		132
2.5.2.3. Conclusion.		133
2.5.3. Calcul du couple moyen en régime permanent.		133
2.5.3.1. Courants rotoriques réels.		133
2.5.3.2. Calcul du couple moyen.		134
2.5.4. Bilan de puissance-relations fondamentales.		134
2.6. Principales utilisations de la machine asynchrone alimentée	par un réseau de tension et fréquence constante	137
2.6.1. Fonctionnement en moteur.		137
2.6.1.1. Caractéristique couple-vitesse.		137
2.6.1.2. Facteur de puissance, rendement, puissances active et réactive		139
2.6.1.3. Courant absorbé, démarrage.		142
2.6.1.4. Machine à cage avec déplacement de courant.		144
2.6.1.5. Conclusion, variation non électronique de vitesse.		145
2.6.2. Fonctionnement en génératrice.		146
2.6.3. Fonctionnement en frein.		147
2.6.4. Fonctionnement en moteur à vitesse variable dans le cas	d'une alimentation à fréquence fixe.	149
2.6.4.1. Variation de vitesse par variation de la tension à fréquence	constante.	149
2.6.4.2. Variation de vitesse par action sur la résistance du rotor	d'un moteur à bagues alimenté à tension et fréquence fixes.	150
2.6.5. Présentation de quelques régimes transitoires.		152
2.7. Conclusion et résumé		154
Exercice 2.1. Machine asynchrone : fonctionnement à tension constante	et à fréquence constante	157
Exercice 2.2. Machine asynchrone : fonctionnement en génératrice		171
Exercice 2.3. Moteur asynchrone : cascade hyposynchrone.		177
Exercice 2.4. Moteur asynchrone alimenté en courant		185

Chapitre 3. Machines synchrones	191
3.1. Principe et constitution	191
3.1.1. Description générale.	191
3.1.2. Principe de fonctionnement.	194
3.1.3. Constituants.	195
3.1.3.1. Inducteur tournant bobiné.	195
3.1.3.2. Inducteur tournant à aimants permanents.	199
3.1.3.3. Inducteur tournant à double excitation.	200
3.1.3.4. Induit statorique.	200
3.2. Fonctionnements à vide et en charge, en alternateur ou en générateur.	203
3.2.1. Fonctionnement à vide.	203
3.2.1.1. Flux créé par le rotor (flux rotorique).	204
3.2.1.2. F.e.m à vide.	205
3.2.2. Machine en charge.	206
3.3. Modélisation de la machine synchrone sans amortisseurs	207
3.3.1. Hypothèses.	207
3.3.2. Equation vectorielle d'une machine à entrefer lisse.	208
3.3.2.1. Dans le repère statorique S ($\alpha\beta$).	208
3.3.2.2. Equations dans le repère tournant T(dq).	210
3.3.2.3. Calcul du couple.	212
3.3.3. Etude de la machine à entrefer variable.	213
3.3.3.1. Equation vectorielle dans le repère S.	213
3.3.3.2. Equations dans le repère T.	213
3.3.3.3. Calcul du couple.	214
3.4. Modèle des machines en régime permanent sinusoïdal équilibré.	215
3.4.1. Calcul des performances d'une machine à entrefer lisse en régime permanent.	216
3.4.1.1. Calcul du couple.	216
3.4.1.2. Diagramme de Beln Eschenburg (équations de la machine à pôles lisses en régime permanent).	217
3.4.1.3. Identification des paramètres de la machine.	219
3.4.2. Performances de la machine à entrefer variable en régime permanent sinusoïdal.	220
3.4.2.1. Equations de la machine.	220
3.4.2.2. Calcul du couple.	221
3.4.3. Conclusion.	221
3.5. Etude d'une machine synchrone avec circuits amortisseurs.	222

3.6. Fonctionnement en régime permanent comme alternateur	226
3.6.1. Machine synchrone reliée à un réseau de puissance infinie.	226
3.6.1.1. Diagramme de fonctionnement.	226
3.6.1.2. Limites de fonctionnement.	232
3.6.1.3. Couplage d'un alternateur sur un réseau.	234
3.6.1.4. Nouveaux concepts.	235
3.6.1.5. Fonctionnements particuliers.	236
3.6.1.6. Fonctionnement comme moteur synchrone.	238
3.6.2. Alternateur isolé ou autonome.	241
3.7. Pertes, rendement et quelques ordres de grandeurs.	244
3.7.1. Bilan de puissance.	244
3.7.2. Exemples.	245
3.7.3. Eléments de dimensionnement.	246
3.8. Conclusion et résumé	247

Exercice 3.1. Machine synchrone : fonctionnement de la machine couplée au réseau	249
Exercice 3.2. Machine synchrone : fonctionnement en alternateur indépendant.	259
Exercice 3.3. Etude d'une machine synchrone entraînée par une éolienne	267

Chapitre 4. Machines polyphasées à vitesse variable 275

4.1. Introduction.	275
4.2. Machine asynchrone triphasée à vitesse variable.	279
4.2.1. Variation de vitesse par alimentation en boucle ouverte et à loi V/f imposée.	281
4.2.1.1. Principe de la méthode.	281
4.2.1.2. Mise en œuvre.	283
4.2.2. Contrôle dynamique du couple par contrôle du flux rotorique : commande à flux orienté.	286
4.2.2.1. Principe de la méthode.	286
4.2.2.2. Algorithmes de contrôle du couple.	288
4.2.2.3. Mise en œuvre.	290
4.2.2.4. Performances obtenues.	293
4.2.2.5. Installation du flux rotorique ϕ_2 sur l'axe d du repère T.	294
4.2.2.6. Régulation de vitesse.	296
4.3. Variation de vitesse avec des machines synchrones	296
4.3.1. Nécessité d'un autopilotage.	297

4.3.2. Principe de l'autopilotage.	299
4.3.3. Commande dans les axes abc (commande scalaire).	303
4.3.4. Commande dans le repère tournant (dq) ; commande vectorielle	306
4.3.5. Réversibilités.	309
4.4. Conclusion.	310
Exercice 4.1. Machine asynchrone à vitesse variable.	313
Exercice 4.2. Machine asynchrone à commande vectorielle	319
Exercice 4.3. Modèle d'une machine synchrone triphasée à aimants	325
Exercice 4.4. Commande de la vitesse d'une machine synchrone triphasée à enroulement inducteur	333
Exercice 4.5. Influence de la charge mécanique	341
Chapitre 5. Machines électriques tournantes spéciales	349
5.1. Introduction	349
5.2. Machines monophasées	350
5.2.1. Les moteurs à collecteur.	350
5.2.2. Moteurs asynchrones monophasés à capacité de démarrage.	352
5.2.3. Machines asynchrones monophasées à spires de déphasage.	357
5.3. Machines synchrones triphasées.	357
5.3.1. Les machines synchrones à griffes.	358
5.3.2. Les machines à reluctance commutée.	359
5.4. Machines asynchrones triphasées	362
5.4.1. Machines asynchrones synchronisées.	362
5.4.2. Machines asynchrones à double alimentation.	363
5.5. Conclusion.	365
Bibliographie	367

Entraînements électriques, ouvrage en deux volumes, traite des machines électriques courantes et de leurs alimentations électroniques de puissance qui sont aujourd'hui indissociables.

Après une présentation des principes de base des machines à courant alternatif qui constituent la grande majorité des motorisations industrielles, cet ouvrage propose une étude complète des machines asynchrones et synchrones vues par les utilisateurs. La modélisation vectorielle utilisée permet d'obtenir des équations générales et synthétiques directement à partir des lois rappelées dans le premier volume.

Les derniers chapitres sont consacrés aux systèmes à vitesse variable utilisant les machines précédentes et aux machines de plus faibles puissances. Des exercices illustrent les différentes présentations théoriques.

Les auteurs

Robert Perret, Albert Foggia, Elisabeth Rullière et Pascal Tixador sont enseignants chercheurs au laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG) ; ils enseignent à l'Ecole nationale supérieure des ingénieurs électriciens de Grenoble, première école de l'Institut national polytechnique de Grenoble.

