



EGEM

électronique – génie électrique – microsystemes

Modélisation des machines électriques en vue de leur commande

concepts généraux

*sous la direction de
Jean-Paul Louis*

 **hermes**

Lavoisier

Table des matières

Introduction	17
Chapitre 1. Conversion électromécanique d'énergie : du phénomène physique à la modélisation dynamique	27
Ernest MATAGNE, Manuel DA SILVA GARRIDO	
1.1. Introduction	27
1.2. Le phénomène physique	28
1.3. Modélisation dynamique	36
1.4. Equations matricielles des machines électriques	42
1.4.1. Equation matricielle électrique	44
1.4.2. Equation matricielle mécanique	49
1.5. Exemple d'application : la machine synchrone à aimants permanents	50
1.5.1. Cas de matériaux magnétiques linéaires	51
1.5.2. Prise en compte de la saturation dans le cas d'enroulements sinusoïdaux	52
1.6. Bibliographie	53
Chapitre 2. Modèles dynamiques des systèmes en génie électrique	55
Yvan BONNASSIEUX, Edouard LAROCHE, Mohamed Fouad BENKHORIS, Jean-Paul LOUIS	
2.1. Introduction	55
2.2. Modèle de synthèse : modèle direct et modèle inverse d'une machine asynchrone (flux rotorique orienté)	57
2.2.1. Introduction : modèle inverse/modèle direct	57
2.2.2. Modélisation de Park de la machine asynchrone	58
2.2.2.1. Expression factorisée et projetée des flux et du couple	58
2.2.2.2. Changement de repère par rotation : transformation de Park	61

2.2.2.3. Représentation d'état continu.	62
2.2.3. Modèle de la commande : flux rotorique orienté	64
2.2.4. Modèle dynamique de la machine asynchrone	66
2.3. Modèles d'analyses	68
2.3.1. Introduction	68
2.3.2. Approche multimodèle : cas de la machine asynchrone	69
2.3.2.1. Modèles tenant compte de la saturation magnétique	69
2.3.2.2. Modèles tenant compte des pertes fer	72
2.3.3. Approche par la valeur singulière structurée : cas de la machine synchrone	73
2.3.3.1. Rappel sur la modélisation de la machine synchrone.	73
2.3.3.2. Incertitudes paramétriques	75
2.3.3.3. Erreur de modèle de l'onduleur	80
2.3.3.4. Mise sous forme généralisée	84
2.3.3.5. Valeur singulière structurée et μ -analyse.	84
2.4. Modèle de simulation	85
2.4.1. Introduction	85
2.4.2. Description du système physique.	88
2.4.3. Modélisation des « convertisseurs »	88
2.4.3.1. Redresseur	88
2.4.3.2. Commutateur	89
2.4.4. Modélisation du système de puissance	89
2.4.4.1. Equations électriques générales de base de la machine synchrone	90
2.4.4.2. Equations des différents modes de fonctionnement du système de puissance	91
2.4.5. Calcul de l'inverse de la matrice inductance	96
2.4.6. Modèle simplifié du système de puissance en régime permanent.	97
2.4.6.1. Equations électriques du mode 2.	99
2.4.6.2. Equations électriques du mode 3.	99
2.5. Conclusion	100
2.6. Bibliographie	101

Chapitre 3. Modélisation physique des machines à courant alternatif . . . 103
 Jean-Paul LOUIS, Gilles FELD, Sandrine MOREAU

3.1. Introduction.	103
3.2. Rappel des lois physiques relatives au champ magnétique et à la conversion d'énergie	105
3.2.1. Le champ électromagnétique	105
3.2.1.1. Les vecteurs fondamentaux et les sources du champ	105
3.2.1.2. Matériaux : lois de comportement macroscopiques.	106

3.2.1.3. Equations de Maxwell dans le cadre de l'approximation des états quasi permanents dans les systèmes de conversion d'énergie	107
3.2.1.4. Circuits électriques et macroscopiques globaux : hypothèses pratiques	108
3.2.2. Variables macroscopiques et lois intégrales	108
3.2.2.1. Les grandeurs macroscopiques utilisées	108
3.2.2.2. Les équations de Maxwell sous forme intégrale : conservation du flux et théorème d'Ampère	109
3.2.2.3. Force magnétomotrice et perméance superficielle	111
3.2.3. Le théorème de Faraday pour les circuits filiformes	114
3.2.4. Conversion d'énergie	116
3.2.4.1. Energie magnétique, force et couple électromagnétique (convention : « moteur »)	116
3.2.4.2. Introduction de la co-énergie ; nouvelle expression de la force	118
3.2.4.3. Cas des machines à aimant	119
3.2.4.4. Cas des matériaux linéaires, confusion entre l'énergie magnétique et la co-énergie magnétique, calcul pratique des couples électromagnétiques	119
3.2.4.5. Force sur un conducteur placé dans le vide et subissant un champ B : loi de Laplace	121
3.3. Structure des machines tournantes à courant alternatif : description par les forces magnétomotrices	122
3.3.1. Structures générales	122
3.3.1.1. On cherche à maximiser les forces et les différences de potentiel (ddp)	122
3.3.1.2. Les structures géométriques élémentaires	125
3.3.1.3. Propriétés physiques et géométriques mises à profit pour la démarche débouchant sur la modélisation des machines électriques	126
3.3.2. Modélisation à l'aide de l'enroulement diamétral concentré	131
3.3.2.1. Méthodologie	131
3.3.2.2. La géométrie et les propriétés fondamentales	131
3.3.2.3. Les grandeurs physiques fondamentales	132
3.3.2.4. Perméance superficielle des machine à pôles lisses et à pôles saillants	133
3.3.2.5. Détermination de la force magnétomotrice créée par l'enroulement concentré diamétral	134
3.3.2.6. Développement de la fonction « force magnétomotrice » en série de Fourier (rôle des symétries)	136
3.3.2.7. Théorie au premier harmonique avec amélioration des distributions de courant et coefficient de bobinage	136

3.3.3. Différents enroulements, représentation idéalisée ou symbolique, angles mécaniques et angles électriques.	140
3.3.3.1. Enroulements monophasés et triphasés à une paire de pôles	140
3.3.3.2. Enroulements multipolaires : cas des enroulements monophasés.	143
3.3.3.3. Cas des enroulements triphasés multipolaires	145
3.3.3.4. Cas des enroulements à cage	147
3.4. Calcul des inductances des machines à courant alternatif.	149
3.4.1. But et méthodologie	149
3.4.2. Calcul explicite des inductances	153
3.4.2.1. Définitions des angles qui repèrent l'inducteur et l'induit.	153
3.4.2.2. Détermination de l'expression de l'induction	153
3.4.2.3. Calcul du flux	154
3.4.2.4. Détermination de l'expression de l'inductance mutuelle entre les enroulements δ et γ	155
3.5. Description et modélisation des principales machines à courant alternatif	156
3.5.1. Description et modélisation des machines synchrones	156
3.5.1.1. Introduction	156
3.5.1.2. Machine synchrone à pôles lisses (sans amortisseurs)	158
3.5.1.3. Machine synchrone à pôles saillants, à excitation bobinée, sans amortisseurs	161
3.5.1.4. Description de la machines à pôles saillants avec amortisseurs.	163
3.5.1.5. Formules explicites des éléments des matrices de la machine synchrone	165
3.5.2. Description et modélisation des machines asynchrones	170
3.5.2.1. Généralités.	170
3.5.2.2. Les stators des machines asynchrones	170
3.5.2.3. Les différents types de rotors des machines asynchrones	171
3.5.2.4. Modélisation de la machine asynchrone	173
3.5.2.5. Expression du couple de la machine asynchrone	176
3.6. Conclusion	177
3.7. Bibliographie.	177

Chapitre 4. Propriétés vectorielles des systèmes électriques triphasés . . . 181

Eric SEMAIL, Jean-Paul LOUIS, Gilles FELD

4.1. Problématique et hypothèses.	181
4.1.1. Une présentation générale des transformations	181
4.1.2. Les hypothèses physiques	183
4.1.2.1. Les hypothèses classiques.	183
4.1.2.2. Les équations très générales	184

4.2. Les exemples fondamentaux et leurs modèles	185
4.2.1. Notations des systèmes triphasés et diphasés : écriture vectorielle, écriture matricielle	185
4.2.2. Exemple 0 – Une variable privilégiée : le système sinusoïdal, triphasé, équilibré, direct	186
4.2.3. Les trois exemples fondamentaux décrits par des opérateurs matriciels carrés	187
4.2.3.1. Exemple 1 – Flux propre créé par une armature dans une machine à pôles lisses (stockage d'énergie électromagnétique) : matrice L_p	187
4.2.3.2. Exemple 2 – Gain d'un onduleur (modulation de l'énergie électrique) : matrice G	187
4.2.3.3. Exemple 3 – Flux mutuel (avec conversion d'énergie) : matrice $M_{sf}(\theta)$	188
4.2.4. Les trois exemples complémentaires, venus de la modélisation de la machine synchrone	189
4.2.4.1. Exemple 4 – Excitation d'une machine synchrone : matrice $M_{sf}(\theta)$	189
4.2.4.2. Exemple 5 – Flux propre créé par le stator d'une machine synchrone à pôles saillants : matrice $L_{ss}(\theta)$	189
4.2.4.3. Exemple 6 – Flux mutuel créé par l'amortisseur diphasé (courants i_D et i_Q) d'une machine synchrone dans les enroulements triphasés du stator : matrice $M_{sDQ}(\theta)$	190
4.2.5. Equation différentielle : exemple 7.	190
4.2.6. Des bases de travail « conviviales »	191
4.3. Genèse des bases à partir de l'étude des matrices carrées.	192
4.3.1. Analyse des propriétés mathématiques	193
4.3.1.1. Symétrie seule	193
4.3.1.2. Symétrie et circularité	194
4.3.1.3. Circularité seule, mais les coefficients sont réels	194
4.3.2. Revue des transformations connues à la lumière des propriétés énoncées	195
4.3.2.1. Transformation par la matrice initiale de Clarke.	195
4.3.2.2. Transformation par la matrice normée de Concordia.	196
4.3.2.3. Transformation par la matrice classique de Fortescue	197
4.3.2.4. Note sur la transformée classique de Fortescue	197
4.3.2.5. Transformation par la matrice normée de Lyon	198
4.3.2.6. Transformation par les matrices de Park	199
4.3.2.7. Transformation par les matrices complexes de Ku	201
4.4. Genèse des bases à partir de matrices rectangulaires	201
4.4.1. Cas de l'exemple 4 (matrice M_{sf})	202
4.4.2. Cas de l'exemple 6 (matrice M_{sDQ})	203
4.5. Phaseur complexe : une autre transformation ?	203

4.5.1. Définitions	203
4.5.2. Justification mathématique du phaseur temporel	204
4.5.3. Lien entre phaseur temporel et transformées de Fortescue, de Lyon.	205
4.5.4. Intérêt/inconvénient.	206
4.6. Applications aux exemples.	207
4.6.1. Flux statoriques d'une machine synchrone à pôles saillants avec amortisseurs	207
4.6.2. Flux statoriques d'une machine asynchrone (machine à pôles lisses)	209
4.6.2.1. Approche classique aux valeurs propres	209
4.6.2.2. Approche vectorielle à l'aide du noyau et de l'image	210
4.6.2.3. Prise en compte simultanée des équations aux flux statoriques et rotoriques	212
4.7. Equations aux tensions et changement de bases	215
4.7.1. Règles de dérivation : approche vectorielle.	215
4.7.2. Equations aux tensions sous forme phasorielle.	216
4.8. Essai de synthèse : écriture générale des transformations matricielles sous forme décomposée	218
4.8.1. Généralités : les différentes variantes	218
4.8.2. Des matrices de Clarke et de Fortescue généralisées, un formalisme unifié, relations de cohérence	220
4.8.3. Des matrices de transformation généralisées	222
4.8.4. Une classification des matrices	222
4.8.5. Une décomposition des matrices carrées de dimension 3×3	224
4.8.6. Factorisation des systèmes triphasés et des matrices rectangulaires.	226
4.8.7. Forme générale des transformations triphasées-diphasées de type Clarke-Fortescue.	229
4.8.8. Applications de la transformation triphasé-diphasé de type Clarke-Fortescue.	230
4.8.9. Rotation des repères	232
4.8.9.1. Schéma fonctionnel associé à la transformation directe	232
4.8.9.2. Schéma fonctionnel associé à la transformation inverse	233
4.8.10. Application des rotations aux systèmes triphasés équilibrés directs en régime permanent	233
4.8.11. Quelques applications des changements de repère par rotation	234
4.8.12. Application aux flux mutuels entre le stator et le rotor d'une machine asynchrone	235
4.8.13. Application aux expressions des flux pour une machine synchrone	236
4.8.14. Application à la dérivation dans les repères tournants.	237
4.9. Transformations généralisées de Park et Ku	238

4.9.1. Généralités : transformations décomposées/globales	238
4.9.2. Passage réels-complexes	241
4.10. Conclusion	242
4.11. Bibliographie	243
 Chapitre 5. Modélisation des machines à courant alternatif par les phaseurs	 247
Jean-Paul LOUIS, Gilles FELD, Eric MONMASSON	
5.1. Introduction : usage des phaseurs en électrotechnique	247
5.2. Les outils physiques et mathématiques, les hypothèses	248
5.2.1. Hypothèses physiques, les forces magnétomotrices	248
5.2.2. Forces magnétomotrices résultantes et outils matriciels réels	249
5.2.3. Outils matriciels complexes	250
5.2.4. Hypothèse de linéarité, perméance superficielle et induction dans l'entrefer	251
5.3. Une définition des phaseurs temporels, équivalence diphasé-triphasé, cas réel	252
5.4. Inversion des formules, composante homopolaire, reconstitution des grandeurs triphasées	254
5.5. Formes cartésiennes et polaires : phaseur spatio-temporel sous forme réelle	254
5.6. Une définition complexe des phaseurs temporels et spatio-temporels	256
5.7. Détermination directe du phaseur complexe à partir des grandeurs temporelles triphasées	257
5.8. Application au régime permanent	259
5.9. Expressions de la puissance	260
5.9.1. Forme réelle	261
5.9.2. Forme complexe	261
5.10. Modélisation des machines électriques à pôles lisses par les phaseurs, courant magnétisant et champ total	262
5.10.1. Phaseurs temporels et spatio-temporels au stator et au rotor	262
5.10.2. Champ total et courant magnétisant	264
5.10.2.1. Champ total temporel	264
5.10.2.2. Champ total et courant magnétisant en régime permanent	264
5.10.2.3. Champ total et courant magnétisant en régime transitoire quelconque	266
5.10.3. Extension à l'excitation rotorique en courant continu	268
5.11. Calcul du flux dans les machines à pôles lisses	270
5.11.1. Calcul du flux principal dans une phase	270
5.11.2. Application : flux principal dans un stator	271
5.11.2.1. Détermination du phaseur associé aux flux	271

16 Modélisation et commande. Concepts généraux

5.11.2.2. Equivalence des phaseurs	273
5.11.3. Application : modèle du flux statorique dans une machine asynchrone	273
5.11.4. Application : modèle du flux rotorique dans une machine asynchrone	274
5.11.5. Application : modèle du flux statorique dans une machine synchrone	275
5.12. Le phaseur mathématique.	276
5.12.1. Définition et discussion.	276
5.12.2. Inversion	278
5.12.3. Applications au régime permanent sinusoïdal	279
5.12.4. Applications à l'onduleur de tension triphasé.	280
5.12.5. Applications à la modélisation de la machine asynchrone	284
5.13. Conclusion	289
5.14. Bibliographie	290
Index	293