



EGEM

électronique – génie électrique – microsystemes

**Modèles
pour la commande
des actionneurs électriques**

*sous la direction de
Jean-Paul Louis*

 **hermes**

Lavoisier

Table des matières

Introduction	17
Chapitre 1. Propriétés dynamiques de la machine à courant continu.	
Modèles directs et inverses	29
Jean-Paul HAUTIER	
1.1. A propos de la modélisation	29
1.1.1. De l'observation à la connaissance	29
1.1.2. Du rôle de l'expertise	30
1.2. Modèle causal de la machine à courant continu	32
1.2.1. Les relations de transformation	32
1.2.2. Application à la machine à courant continu	33
1.2.2.1. Quantification des relations	33
1.2.2.2. Etablissement du modèle	34
1.2.2.3. Simplification du modèle	36
1.3. A propos de la commande	37
1.3.1. Principes d'inversion	38
1.3.1.1. Relation rigide	38
1.3.1.2. Relation causale	38
1.3.1.3. Opérateurs – Compensation, linéarisation, anticipation	38
1.3.1.3.1. Compensation	39
1.3.1.3.2. Linéarisation	39
1.3.1.3.3. Anticipation	39
1.3.2. L'observation des grandeurs – Notations	40
1.3.3. Modèle de commande de la machine à courant continu	42
1.3.3.1. Construction du modèle	42
1.3.3.2. Utilisation du modèle	44
1.3.3.2.1. Concernant la boucle interne de courant	44
1.3.3.2.2. Réglage de la boucle de courant	46
1.3.3.2.3. Intérêt de l'observateur de charge	48

1.3.4. Interprétation globale de la commande	49
1.3.4.1. Le GIC : genèse du retour d'état.	49
1.3.4.2. Vers la commande à structure variable	51
1.4. Conclusion	52
1.5. Bibliographie.	52

Chapitre 2. Modèles dynamiques des machines synchrones. 55

François-Michel SARGOS, Farid MEIBODY-TABAR

2.1. Introduction.	55
2.2. Généralités sur les structures et les modèles	57
2.2.1. Structures des machines ; premières hypothèses de modélisation	57
2.2.2. Autres hypothèses. Modèle des machines triphasées sinusoïdales	59
2.3. Transformation de Concordia et modèle diphasé équivalent.	64
2.3.1 Inductances statoriques	68
2.3.2. Mutuelles stator-excitation et stator-amortisseurs	69
2.3.3. Résistances.	70
2.3.4. Equations du modèle diphasé	70
2.4. Transformation de Park.	71
2.5. Equations de Park des machines synchrones	74
2.5.1. Machine lisse sans amortisseur dans le repère de Park, $\alpha_s = \omega t + \alpha_0$	75
2.5.2. Equations dans le repère de Park par la rotation $\alpha_s = \theta$	75
2.5.2.1. Expression générale des tensions en fonction des flux.	75
2.5.2.2. Puissances externes et couple	77
2.5.2.3. Equations générales des tensions en fonction des courants	78
2.5.2.3.1. Machines à pôles lisses	78
2.5.2.3.2. Machines à pôles saillants	79
2.5.3. Equations du régime stationnaire.	80
2.5.3.1. Solution stationnaire	80
2.5.3.2. Paramètres.	80
2.5.3.3. Définitions et notations du régime stationnaire communes à toutes les machines.	82
2.5.3.4. Machines à pôles lisses en régime stationnaire	85
2.5.3.5. Machines à pôles saillants en régime stationnaire	87
2.5.3.5.1. Tension constante	88
2.5.3.5.2. Excitation constante.	88
2.5.3.6. Conclusion	89
2.6. Analyse des modèles en régime stationnaire	90
2.6.1. Caractéristiques du fonctionnement avec grandeur imposée	92
2.6.1.1. Tension imposée	92
2.6.1.2. Force électromotrice imposée	92
2.6.1.3. Courant imposé	92
2.6.2. Fonctionnement à tension et f.é.m. constantes	92

2.6.2.1. Machines à pôles lisses	93
2.6.2.1.1. Lieux de fonctionnement, puissances limites	93
2.6.2.1.2. Stabilité ; relation entre puissance et décalage interne.	95
2.6.2.2. Machines à pôles saillants	96
2.6.2.2.1. Lieux de fonctionnement, puissances limites	96
2.6.2.2.2. Stabilité	98
2.6.2.2.3. Comparaison des deux types de machines saillantes.	100
2.6.3. Alimentation à courant constant et excitation constante	101
2.6.3.1. Machine à rotor lisse.	101
2.6.3.1.1. Lieu de fonctionnement	101
2.6.3.1.2. Puissance et limite de stabilité	101
2.6.3.2. Machine à rotor saillant	102
2.6.3.2.1. Lieu de fonctionnement.	102
2.6.3.2.2. Puissance et limite de stabilité.	103
2.6.3.2.3. Comparaison des deux types de machines saillantes.	103
2.6.4. Alimentation à courant constant et tension constante (à puissance apparente constante)	104
2.6.4.1. Machines à pôles lisses	106
2.6.4.2. Machines à pôles saillants	107
2.6.4.3. Analyse critique	107
2.6.5. Alimentation à courant direct constant et excitation constante	107
2.6.5.1. Courant direct nul	109
2.6.5.2. Courant direct constant non nul	111
2.6.5.2.1. Machines lisses.	111
2.6.5.2.2. Machines saillantes ; optimisation de la puissance.	112
2.6.6. Alimentation à courant direct constant et tension constante (avec excitation réglable)	113
2.6.6.1. Courant direct nul	114
2.6.6.2. Courant direct constant non nul	116
2.6.6.2.1. Machines lisses.	116
2.6.6.2.2. Machines saillantes	116
2.6.7. Conclusion	116
2.7. Modèles en vue de la commande	118
2.7.1. Modèle d'état général : machines à excitation bobinée.	119
2.7.1.1. Modèle non linéaire complet	119
2.7.1.2. Modèles d'état électrique et mécanique d'ordre réduit.	120
2.7.1.3. Modèles « ramenés au stator »	122
2.7.2. Modèle d'état des machines à aimants	129
2.7.2.1. Circuits équivalents des machines à aimants	129
2.7.2.2. Modèles d'état d'ordre complet et d'ordre réduit.	133
2.7.2.3. Modèles d'état des machines à aimants sans amortisseurs	134
2.7.2.4. Fonction de transfert des machines à aimants	136

2.7.2.5 Modèle d'état de machines à aimants à rotor lisse en vue de leur commande sans capteur mécanique	138
2.7.3. Conclusion	143
2.8. Conclusion générale.	143
2.9. Bibliographie.	145

Chapitre 3. Extension de la transformation de Park aux moteurs synchrones à distribution de champ non sinusoïdales

149

Damien GRENIER, Guy STURTZER, Damien FLIELLER, Jean-Paul LOUIS

3.1. Application de la transformation de Park aux machines à distribution de flux non sinusoïdale.	150
3.2. Extension de Park pour les machines à entrefer constant	156
3.2.1. Propriétés de la transformation de Park	156
3.2.2. Définition d'un repère de Park étendu	156
3.2.3. Dénormalisation de la transformation de Park	164
3.3. Analogies avec les techniques de linéarisation par retour d'état.	166
3.3.1. Cas des machines à entrefer constant	166
3.3.2. Application au cas des machines à entrefer variable	168
3.4. Interprétation de la transformation de Park à partir des courbes isocouples.	170
3.4.1. Cas d'un entrefer constant.	170
3.4.2. Cas d'un entrefer variable – Approximation sinusoïdale.	171
3.4.3. Cas non sinusoïdal	173
3.4.4. Extension de Park dans le cas non sinusoïdal	175
3.5. Mise en œuvre de la commande vectorielle étendue.	178
3.5.1. Application	179
3.6. Conclusion	181
3.7. Bibliographie.	182

Chapitre 4. Modélisation des onduleurs de tension en vue de leur commande en MLI

185

Francis LABRIQUE, Jean-Paul LOUIS

4.1. Rappels sur le fonctionnement d'un onduleur triphasé de tension . . .	185
4.1.1. Structure de l'onduleur et notations	185
4.1.2. Modèle idéalisé du fonctionnement	186
4.1.3. Composantes diphasées et homopolaire des tensions et courants. . .	187
4.1.4. Valeurs accessibles des tensions v_3	189
4.1.5. Schéma fonctionnel de l'onduleur	189
4.1.6. Le problème de la commande.	190
4.2. Les différents types de commande de MLI	191
4.2.1. Commande avec calage à gauche	191

4.2.1.1. Principe	191
4.2.1.2. Convertisseurs numériques-analogiques MLI	192
4.2.1.3. Réalisation sous forme de MLI intersective	193
4.2.1.4. Valeurs de référence des tensions v_{aM} , v_{bM} et v_{cM}	194
4.2.2. Commande avec calage à droite	194
4.2.3. Commande « centrée »	196
4.2.4. MLI intersectives à échantillonnage « naturel »	197
4.3. Modélisation « vectorielle » de la commande MLI	198
4.3.1. Composantes diphasées et homopolaire de v_{3M}	198
4.3.2. Représentation dans le plan de Concordia de la découpe MLI	199
4.3.2.1. Cas du calage à gauche	200
4.3.2.2. Cas du calage à droite	203
4.3.3. Information relative au vecteur $\langle v_3 \rangle$	204
4.4. Le problème de la commande : définition d'un modèle inverse	204
4.5. Commande vectorielle classique	207
4.6. Commande « sinus-triangle »	209
4.7. Conclusion	211
4.8. Bibliographie	211

Chapitre 5. Modélisation dynamique des machines asynchrones 215

Bernard DE FORNEL

5.1. Introduction.	215
5.2. Modélisation d'une machine asynchrone diphasée	216
5.2.1. Mise en équation d'un stator diphasé	216
5.2.2. Stator et rotor diphasés.	218
5.2.2.1. Mise en équations dans des axes liés aux armatures	218
5.2.2.2. Mise en équations dans un même système d'axes	219
5.2.2.3. Expression du couple électromagnétique.	221
5.2.2.4. Machine diphasée-diphasée en régime sinusoïdal	222
5.3. Modélisation d'une machine asynchrone triphasée	225
5.3.1. Modélisation d'un stator triphasé	225
5.3.1.1. Equations d'une armature triphasée.	225
5.3.1.2. Inductances cycliques d'une armature triphasée	226
5.3.2. Machine triphasée-triphasée	227
5.3.3. De machine triphasée-triphasée à machine diphasée-diphasée	229
5.3.3.1. Changement de variables	229
5.3.3.2. Expressions des flux et du couple électromagnétique	232
5.3.3.3. Equations de Park	234
5.3.3.4. Formalisme complexe	240
5.4. Propriétés dynamiques de la machine asynchrone	241
5.4.1 Pôles et zéros en alimentation en tension	242
5.4.1.1. Fonctionnement à vitesse constante	243

5.4.1.2. Fonctionnement à vitesse variable.	250
5.4.1.3. Réponses non minimales de phase	254
5.4.1.4. Conclusion	255
5.4.2. Pôles et zéros en alimentation en courant.	255
5.4.2.1. Fonctionnement à vitesse constante.	256
5.4.2.2. Fonctionnement à vitesse variable.	259
5.4.2.2.1. La pulsation rotorique ω_r est un paramètre	259
5.4.2.2.2. ω_r est une entrée variable.	261
5.4.2.3. Stabilité	264
5.4.2.4. Réponses non minimales de phase	270
5.4.2.5. Conclusion	272
5.5. Modèles dynamiques liés aux commandes	272
5.5.1. Contrôle scalaire	273
5.5.2. Contrôle vectoriel avec flux orienté	273
5.5.2.1. Etude en régime permanent.	273
5.5.2.2. Modèle en régime transitoire.	275
5.5.2.3. Choix du référentiel	275
5.5.2.3.1. Référentiel lié au flux statorique	275
5.5.2.3.2. Référentiel lié au flux rotorique.	276
5.5.2.3.3. Référentiel lié au flux dans l'entrefer	277
5.5.2.4. Conclusion	278
5.5.3. Contrôle direct du couple	279
5.5.3.1. Principes généraux du contrôle direct.	279
5.5.3.2. Caractéristiques principales des commandes directes	279
5.5.3.3. Règles de comportement du flux et du couple.	280
5.6. Conclusion générale.	283
5.7. Bibliographie.	284

Chapitre 6. Modélisation statique des machines asynchrones en vue de leurs commandes scalaires.

Eric MONMASSON, Jean-Paul LOUIS

6.1. Introduction.	289
6.2. Modélisation en régime permanent sinusoïdal	289
6.3. Modèle aux fuites magnétiques totalisées au stator	294
6.3.1. Grandeurs électriques en fonction du flux rotorique	295
6.3.2. Expression du couple électromagnétique	296
6.3.3. Schéma électrique équivalent	298
6.3.4. Diagramme vectoriel	300
6.4. Modèle aux fuites magnétiques totalisées au rotor.	300
6.4.1. Grandeurs électriques en fonction du flux statorique	301
6.4.2. Expression du couple électromagnétique	302
6.4.3. Schéma électrique équivalent	303

6.4.4. Diagramme vectoriel	305
6.5. Commande scalaire en couple	305
6.5.1. Objectifs et principes des lois de commande scalaire	306
6.5.2. Commande scalaire en tension, « loi $U/F = \text{constante}$ »	308
6.5.3. Commande scalaire en courant, flux utile rotorique	310
6.5.4. Commande scalaire directe en flux utile statorique	312
6.6. Conclusion	313
6.7. Annexe : paramètres de la machine asynchrone étudiée	314
6.8. Bibliographie	314
Chapitre 7. Extension de la transformation de Park aux machines asynchrones en régime saturé	317
Betty LEMAIRE-SEMAIL, Jean-Paul LOUIS, Frédéric BOUILLAUT	
7.1. Introduction	317
7.2. Inductances en régime saturé	318
7.2.1. Définition	318
7.2.2. Conditions de calcul par éléments finis	318
7.3. Influence de la saturation sur les inductances	319
7.3.1. Analyse par la méthode des éléments finis	319
7.3.1.1. Etude de la machine triphasée-n-phasée	319
7.3.1.2. Etude de la machine diphasée équivalente	320
7.3.1.3. Résultat des calculs par éléments finis	321
7.3.2. Approche analytique	323
7.3.2.1. Force magnétomotrice, courant magnétisant et rapport de transformation	323
7.3.2.2. Perméance équivalente saturée	324
7.3.2.3. Expression analytique des inductances saturées	324
7.3.2.4. Calcul du coefficient de transformation	326
7.4. Modèle de Park étendu	326
7.4.1. Simplification de l'expression des flux	326
7.4.2. Méthode de calcul des inductances	327
7.4.3. Modèle d'état en flux	328
7.5. Conclusion	329
7.6. Bibliographie	329
Index	331