

MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR

Collection dirigée par Pierre Borne

14 / Électrotechnique

**Commande
vectorielle
de la machine
asynchrone**

**Désensibilisation
et optimisation
par la logique floue**

Benoît Robyns

Bruno François

Philippe Degobert

Jean-Paul Hautier

Editions TECHNIP

ECT69

043988

3

MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR

Collection dirigée par Pierre Borne
Professeur à l'École Centrale de Lille



14 **Électrotechnique**

Commande vectorielle de la machine asynchrone

Désensibilisation et optimisation par la logique floue

Benoît ROBYNS

Professeur à l'École des Hautes Études d'Ingénieur de Lille

Bruno FRANÇOIS

Maître de conférences à l'École Centrale de Lille

Philippe DEGOBERT

Maître de conférences
à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Jean-Paul HAUTIER

Professeur des universités
à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

2007

t

Editions TECHNIP 27 rue Ginoux, 75737 PARIS Cedex 15, FRANCE

Table des matières

PRÉFACE	III
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	XXI
1 CONCEPTS POUR LA CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE	
1.1 Définitions	1
1.1.1 Systèmes électromécaniques.....	1
1.1.2 L'énergie.....	2
1.1.2.1 Caractères généraux de l'énergie	2
1.1.2.2 Expression de l'énergie.....	3
1.1.2.3 Puissance et énergie	3
1.2 Electromagnétisme	4
1.2.1 Formule d'Ampère.....	4
1.2.2 Loi de Laplace.....	5
1.2.3 Flux d'induction.....	6
1.2.4 Champ magnétique	7
1.2.4.1 Définition.....	7
1.2.4.2 Théorème d'Ampère	7
1.2.4.3 Loi d'Hopkinson.....	8
1.2.4.4 Inductance.....	8
1.2.5 Matériau magnétique.....	9
1.2.6 Loi de Faraday	11
1.2.6.1 Expression.....	11
1.2.6.2 Loi d'Ohm généralisée.....	13
1.2.6.3 Flux coupé, flux embrassé, orientation	14
1.3 Représentation causale.....	15
1.3.1 Préambule	15
1.3.2 Causalité de la loi de Faraday	15
1.3.3 Energie électromagnétique.....	19

1.4 La conversion électromécanique	23
1.4.1 Principe de la conversion électromécanique	23
1.4.2 Conversion électromécanique élémentaire.....	26
1.4.2.1 Définition de la structure de conversion	26
1.4.2.2 Etude de la transformation électromécanique	27
1.4.2.3 Représentation causale de la transformation électromécanique élémentaire.....	32
1.4.2.4 Modélisation de la partie mécanique.....	33
1.4.2.5 Analyse par la simulation.....	36

2 MODÈLES DYNAMIQUES DES MACHINES ASYNCHRONES

2.1 Présentation de la machine asynchrone triphasée.....	42
2.1.1 Constitution et structure	42
2.1.2 Principe de fonctionnement	42
2.1.3 Représentation équivalente et formulation vectorielle.....	44
2.2 Modèle dynamique dans le repère triphasé.....	46
2.2.1 Hypothèses.....	46
2.2.2 Etude de la conversion électromécanique	47
2.2.2.1 Conversions électriques	47
2.2.2.2 Transformation électromécanique.....	52
2.2.2.3 Graphe Informationnel Causal du modèle	53
2.3 Modèle dynamique dans un repère diphasé.....	55
2.3.1 Vecteur tournant dans un repère triphasé	55
2.3.2 Vecteur tournant dans un repère diphasé	56
2.3.3 Matrices de transformation	57
2.3.4 Modèle vectoriel dans un repère diphasé	60
2.3.4.1 Principe	60
2.3.4.2 Application aux expressions des flux.....	61
2.3.4.3 Application aux équations différentielles.....	62
2.3.4.4 Machine diphasée équivalente	63
2.3.4.5 Application à l'expression du couple.....	63
2.3.4.6 Fonctionnement sous régime équilibré	64
2.4 Modèle vectoriel dans un repère diphasé tournant	65
2.4.1 Transformée de Park	65
2.4.2 Modèle d'une machine asynchrone dans le repère de Park.....	67
2.4.2.1 Principe	67
2.4.2.2 Détermination des équations différentielles.....	69
2.4.2.3 Détermination des équations entre flux et courants	70
2.4.2.4 Calcul du couple	71

2.4.3 Modèle général dans le repère de Park.....	72
2.4.3.1 Mise en équation de la partie électromagnétique	72
2.4.3.2 Machine de Park équivalente	73
2.4.4 Modèle utilisant le flux rotorique.....	74
2.4.4.1 Principe et graphe informationnel causal du modèle	74
2.4.4.2 Représentation d'état	77
2.4.5 Modèle utilisant le flux statorique.....	79
2.4.5.1 Principe et graphe informationnel causal du modèle	79
2.4.5.2 Représentation d'état	80
2.4.6 Modèle orienté « système »	82
2.5 Prise en compte de la saturation magnétique.....	85
2.6 Conclusion	87
3 CONTRÔLE VECTORIEL DE LA MACHINE ASYNCHRONE	
3.1 Formalisme pour la conception des dispositifs de commande.....	91
3.1.1 Les concepts du modèle inverse.....	91
3.1.2 Inversion directe d'une relation instantanée.....	91
3.1.3 Inversion indirecte d'une relation causale.....	92
3.1.4 Inversion indirecte d'une relation à entrées multiples.....	93
3.1.5 Détermination de la structure d'une loi de commande.....	94
3.1.5.1 Structure maximale de commande	94
3.1.5.2 Structure de commande réduite aux grandeurs mesurables	95
3.1.5.3 Structure de commande à base d'estimateurs	97
3.1.5.4 Structure de commande à base d'observateurs	97
3.1.5.5 Structure de commande à base de correcteurs réjecteurs.....	99
3.1.6 Application à la commande d'une machine à courant continu.....	100
3.1.7 Généralisation par représentation d'état.....	104
3.1.7.1 Equations d'état	104
3.1.7.2 Estimateurs d'état.....	105
3.1.7.3 Observateurs d'état	106
3.2 Stratégies de commande par orientation du flux.....	108
3.3 Commande vectorielle à flux rotorique orienté	109
3.3.1 Modélisation avec a priori sur l'orientation du flux.....	109
3.3.1.1 Mise en équation et graphe informationnel causal du modèle.....	109
3.3.1.2 Détermination du courant magnétisant	111
3.3.1.3 Détermination du couple.....	113
3.3.1.4 Incidence de l'orientation du référentiel	115

3.3.2	Contrôle vectoriel du flux rotorique et du couple	115
3.3.2.1	Structure de commande par inversion du modèle	115
3.3.2.2	Contrôle du couple par inversion du modèle	116
3.3.2.3	Estimation du courant magnétisant	118
3.3.2.4	Autopilotage explicite du référentiel	120
3.3.2.5	Autopilotage implicite du référentiel	121
3.3.2.6	Contrôle direct et indirect du flux avec a priori	122
3.4	Commande à base d'observateur du flux rotorique	125
3.4.1	Commande sans a priori sur l'orientation du flux	125
3.4.2	Représentation d'état adaptée à l'observation du flux rotorique	126
3.4.3	Observateurs du flux rotorique	128
3.4.3.1	Observateur d'ordre réduit	128
3.4.3.2	Observateur d'ordre complet	132
3.4.3.3	Détermination des gains par placement de pôles	134
3.4.4	Orientation vectorielle dans un référentiel immobile	136
3.4.5	Contrôle vectoriel direct du flux sans a priori	137
3.5	Discretisation des estimateurs et observateurs	138
3.6	Conclusion	140
4 THÉORIE DE LA SENSIBILITÉ PARAMÉTRIQUE		
4.1	Position du problème	143
4.2	Etude théorique de la sensibilité paramétrique	145
4.2.1	Erreurs sur le contrôle du flux magnétique	145
4.2.1.1	Concept et hypothèses	145
4.2.1.2	Cas des commandes avec a priori	148
4.2.1.3	Cas des commandes sans a priori	149
4.2.2	Application aux commandes avec a priori sur le flux rotorique	151
4.2.2.1	Influence de la stratégie de régulation des courants	151
4.2.2.2	Influence de la stratégie d'orientation du flux rotorique	166
4.2.2.3	Influence de la stratégie d'estimation du flux rotorique	168
4.2.3	Application aux commandes sans a priori	170
4.2.3.1	Observateur du flux rotorique dans le référentiel du stator	170
4.2.3.2	Choix des gains de l'observateur	172
4.3	Synthèse	176
4.3.1	Commande avec a priori sur le flux rotorique	176
4.3.2	Commande sans a priori	178
4.4	Paramètres de la machine asynchrone testée	178

5 SUPERVISEUR FLOU

5.1	Principes de la logique floue	179
5.2	Combinaison de deux stratégies d'orientation du flux	182
5.2.1	Combinaison des autopilotages explicite et implicite	182
5.2.2	Variations du courant statorique consommé	183
5.2.3	Introduction d'un superviseur à logique floue	184
5.2.3.1	Développement d'un superviseur à logique floue	184
5.2.3.2	Comparaison théorique	189
5.2.3.3	Comparaison expérimentale	192
5.3	Combinaison de deux stratégies d'estimation du flux	193
5.3.1	Combinaison des estimations du courant magnétisant	193
5.3.2	Limitation théorique	196
5.3.3	Variations du courant statorique consommé	197
5.3.4	Introduction d'un superviseur à logique floue	198
5.3.4.1	Développement d'un superviseur à logique floue	198
5.3.4.2	Comparaison théorique	201
5.3.4.3	Comparaison expérimentale	203
5.4	Optimisation de l'observateur de flux rotorique d'ordre réduit	207
5.4.1	Introduction	207
5.4.2	Sensibilité de l'estimateur de flux d'ordre réduit	207
5.4.3	Détermination des gains de l'observateur au moyen d'un superviseur à logique floue	208
5.4.3.1	Développement d'un superviseur à logique floue	208
5.4.3.2	Résultats théoriques	211
5.4.3.2	Résultats expérimentaux	214

6 APPLICATIONS

6.1	Stockage inertiel d'énergie associé à un système énergétique couplé éolien-diesel	221
6.1.1	Introduction	221
6.1.2	Contrôle du système de stockage inertiel	223
6.1.2.1	Stratégie de contrôle de la puissance	223
6.1.2.2	Superviseur à logique floue de la puissance stockée	223
6.1.2.3	Supervision de la machine asynchrone	225
6.1.3	Résultats	227
6.1.4	Paramètres de la machine asynchrone couplée au volant	232

6.2	Traction électrique	233
6.2.1	Spécificité de l'application.....	233
6.2.2	Etude de sensibilité sur le contrôle du couple	234
6.2.3	Résultats en régime dynamique	240
6.2.4	Paramètres de la machine asynchrone de traction.....	243
SYNTHÈSE ET CONCLUSION		245
BIBLIOGRAPHIE		249

Cette collection s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants de licence et de Master, ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens supérieurs en activité désirant actualiser ou compléter leur formation dans les sciences de l'ingénieur.

► **Benoît Robyns**
► **Bruno François**

► **Philippe Degobert**
► **Jean-Paul Hautier**

14

Commande vectorielle de la machine asynchrone

Dans beaucoup d'applications à vitesse variable, comme la traction ferroviaire par exemple, la machine asynchrone tend à se substituer à la machine à courant continu. Cette évolution, motivée par d'indéniables qualités de robustesse et de fiabilité, est permise grâce aux convertisseurs électroniques de puissance et aux processeurs numériques pour leur commande. Toutefois, un problème majeur se pose : le modèle de Park classique de la machine, indispensable à la conception de son dispositif de commande, dépend de paramètres variant fortement selon les conditions de fonctionnement de la machine.

Après les rappels des principales lois physiques et des concepts fondamentaux propres à la conversion électromécanique, sont présentés les modèles mathématiques classiques de la machine asynchrone, quelle que soit la technologie du rotor, et les différentes stratégies de commande vectorielle de la machine asynchrone à cage. L'utilisation du formalisme des Graphes Informationnels Causaux (G.I.C.) dans ce livre permet de systématiser la démarche de conception et d'uniformiser la structure d'un dispositif de commande.

Puis l'ouvrage propose une approche originale qui permet de réduire la sensibilité paramétrique des commandes vectorielles basées sur une analyse théorique de cette sensibilité. Ce qui amène à proposer des stratégies de contrôle basées sur la combinaison de différentes commandes ayant des propriétés de robustesse différentes, à l'aide de superviseurs à logique floue. Des applications et de nombreux résultats expérimentaux viennent confirmer le bien-fondé de cette solution simple, reproductible et applicable à d'autres systèmes complexes.

L'ouvrage s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants de masters, aux ingénieurs Recherche & Développement et aux chercheurs.

Benoît Robyns est professeur à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur de Lille (HEI) et directeur de la recherche.

Bruno François est maître de conférences à l'École Centrale de Lille et habilité à diriger des recherches.

Philippe Degobert est maître de conférences au centre de Lille de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

Jean-Paul Hautier est professeur des universités à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, dont il assure la direction générale.

Tous les quatre sont chercheurs au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille.



ISBN 978-2-7108-0834-3

www.editionstechnip.com

graphisme