

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

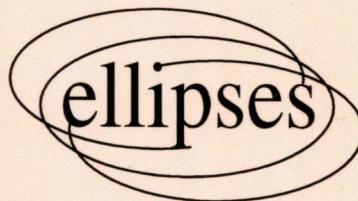
## ÉLECTROTECHNIQUE

# Modélisation et commande des moteurs triphasés

Commande vectorielle des moteurs synchrones  
Commande numérique par contrôleurs DSP

Guy STURTZER

Eddie SMIGIEL





# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## ÉLECTROTECHNIQUE

# Modélisation et commande des moteurs triphasés

Commande vectorielle des moteurs synchrones  
Commande numérique par contrôleurs DSP

Guy STURTZER

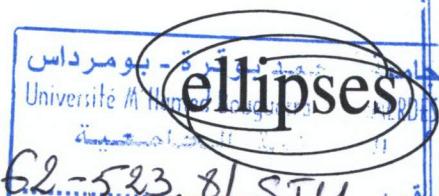
Agrégé

ENS Arts et Industries, Strasbourg

Eddie SMIGIEL

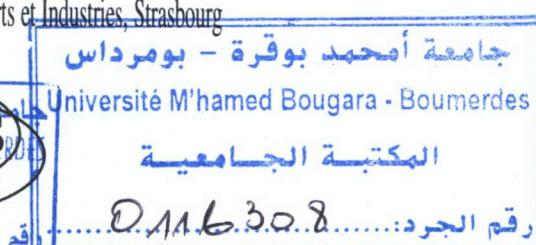
Agrégé

ENS Arts et Industries, Strasbourg



62-523.8/STU

D.116.30.8



5 esp.

# Table des matières

<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>I</b>
<b>AVANT PROPOS.....</b>	<b>V</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>VII</b>
<b>I. CALCUL DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.....</b>	<b>1</b>
1. Couple électromagnétique instantané.....	1
1.1. Bilan énergétique.....	1
1.2. Expression générale du couple électromagnétique instantané.....	2
1.3. Expression générale du couple électromagnétique en fonction de la coénergie.....	3
1.4. Cas typiques d'utilisations des expressions du couple.....	5
2. Couple utile des machines tournantes.....	7
2.1. Champ tournant créé par un stator triphasé.....	7
2.2. Couple développé par les machines triphasées à entrefer constant.....	9
2.3. Couple développé par les machines triphasées à entrefer variable.....	13
3. Conclusion.....	16
<b>II. OUTILS MATHÉMATIQUES POUR L'ETUDE DES CONVERTISSEURS TRIPHASES.....</b>	<b>17</b>
1. Transformation des systèmes.....	17
1.1. Intérêt des matrices de transformations.....	17
1.2. Notations.....	18
2. Matrices de transformations.....	18
2.1. Introduction.....	18
2.2. Transformation de Concordia.....	18
2.3. Transformation de Park.....	24
<b>III. STRUCTURES DES MOTEURS SYNCHRONES ET ASYNCHRONES.....</b>	<b>31</b>
1. Classification des moteurs synchrones.....	31
2. Structures des machines synchrones à inducteurs bobinés.....	31
2.1. Le stator.....	31
2.2. Rotor à pôles saillants.....	32
2.3. Rotor à pôles lisses.....	33
3. Structures des machines synchrones à aimants permanents.....	34
3.1. Considérations générales à propos des aimants permanents.....	34
3.2. Les différents types d'aimants permanents pour inducteurs.....	39
3.3. Moteurs synchrones à aimants permanents sans pièce polaire.....	40
3.4. Moteurs synchrones à aimants permanents avec pièces polaires.....	42

<b>4. Structures des machines asynchrones.....</b>	<b>44</b>
4.1. Stator.....	44
4.2. Rotor.....	44
<b>5. Structures des machines diphasées.....</b>	<b>46</b>
<b>IV. MODELISATION DYNAMIQUE DES MOTEURS SYNCHRONES ET ASYNCHRONES.....</b>	<b>47</b>
<b>1. Moteur synchrone à pôles saillants à inducteur bobiné.....</b>	<b>47</b>
1.1. Hypothèses et présentation du modèle de base. Conventions et symboles.....	47
1.2. Définition des matrices inductances.....	49
<b>2. Modèle en abc du moteur synchrone à pôles saillants.....</b>	<b>52</b>
<b>3. Modèle vectoriel du moteur synchrone à pôles saillants.....</b>	<b>53</b>
3.1. Factorisation des matrices inductances.....	53
3.2. Mise en équation du modèle vectoriel du moteur synchrone à pôles saillants.....	56
3.3. Représentation fonctionnelle.....	70
<b>4. Moteur synchrone à pôles lisses à inducteur bobiné.....</b>	<b>72</b>
4.1. Inductances propres et mutuelles.....	72
4.2. Modèle en abc.....	73
4.3. Modèle vectoriel.....	73
<b>5. Moteur synchrone à aimants permanents à pôles saillants.....</b>	<b>78</b>
5.1. Inductances et flux inducteur.....	78
5.2. Modèle en abc.....	80
5.3. Modèle vectoriel.....	81
<b>6. Moteur synchrone à aimants permanents à pôles lisses.....</b>	<b>88</b>
<b>7. Moteur synchrone diphasé.....</b>	<b>88</b>
7.1. Introduction.....	88
7.2. Modèle en abc.....	90
7.3. Modèle vectoriel.....	90
<b>8. Moteur asynchrone triphasé.....</b>	<b>91</b>
8.1. Matrices inductances et résistances.....	91
8.2. Modèle en abc.....	93
8.3. Modèle vectoriel.....	93
8.4. Changement de variable.....	95
8.5. Matrice impédance et fonction de transfert.....	95
<b>V. STRATEGIES DE CONTROLE ET DE COMMANDE DES MOTEURS SYNCHRONES.....</b>	<b>99</b>
<b>1. Diagrammes vectoriels.....</b>	<b>99</b>
1.1. Grandeurs complexes instantanées.....	99
1.2. Diagrammes vectoriels en régime permanent.....	101
<b>2. Réglage du couple en régime permanent.....</b>	<b>104</b>

2.1. Couple électromagnétique en régime permanent.....	104
2.2. Réglage du couple par la tension statorique.....	105
2.3. Réglage du couple par les courants statoriques.....	110
2.4. Réglage de la puissance réactive.....	113
<b>3. Autopilotage.....</b>	<b>116</b>
<b>4. Contrôle du couple en régime permanent.....</b>	<b>118</b>
4.1. Définition du contrôle vectoriel.....	118
4.2. Commande en courant à couple maximal.....	118
4.3. Contrôle de la tension statorique à couple maximal.....	122
4.4. Commande en courant à facteur de puissance unitaire.....	124
4.5. Lois de commandes simplifiées du moteur à pôles saillants.....	127
4.6. Contrôle du flux.....	128
<b>5. Stratégies de commande en valeurs instantanées.....</b>	<b>130</b>
5.1. Principe du contrôle vectoriel .....	130
5.2. Commande en courant avec utilisation du couple réluctant.....	130
5.3. Contrôle en courant avec loi de commande simplifiée.....	131
5.4. Contrôle en tension.....	132
<b>6. Plan couple-vitesse.....</b>	<b>132</b>
6.1. Limites de fonctionnement.....	132
6.2. Exemple.....	133
6.3. Réduction du flux des moteurs à aimants.....	134
<b>VI. STRUCTURES DE COMMANDES DES MOTEURS SYNCHRONES.....</b>	<b>135</b>
<b>1. Acquisition de la position.....</b>	<b>135</b>
1.1. Introduction.....	135
1.2. Utilisation d'un codeur de position.....	135
1.3. Estimateur de position.....	136
<b>2. Commande vectorielle avec alimentation en tension et commande en courant.....</b>	<b>138</b>
2.1. Régulation des courants $i_d$ et $i_q$ .....	138
2.2. Régulation des courants moteurs par comparateur à hystéresis.....	141
2.3. Commande en courant d'un moteur synchrone diphasé.....	142
<b>3. Commande scalaire avec alimentation en tension et commande en courant.....</b>	<b>144</b>
3.1. Alimentation en courants sinusoïdaux.....	144
3.2. Alimentation des moteurs BRUSHLESS.....	146
<b>4. Moteur synchrone autopiloté à commutateur de courant en commutation naturelle.....</b>	<b>148</b>

<b>5. Moteur synchrone alimenté par cycloconvertisseur.....</b>	<b>155</b>
<b>VII. INTRODUCTION AUX PROCESSEURS DE SIGNAL.....</b>	<b>159</b>
<b>1. Comparaison entre contrôleur analogique et contrôleur numérique.....</b>	<b>160</b>
<b>2. Conditions requises d'un processeur.....</b>	<b>161</b>
2.1. Bruit de quantification.....	162
2.2. Bruit de troncature.....	162
2.3. Cycles limites.....	162
2.4. Traitement des débordements.....	162
2.5. Temps de calcul.....	162
2.6. Intégration de périphériques.....	163
<b>3. Architecture des DSP TMS32010.....</b>	<b>163</b>
3.1. Généralités.....	164
3.2. Eléments arithmétiques.....	166
3.3. Mémoire donnée intégrée.....	167
3.4. Les registres du processeur.....	168
3.5. Mémoire programme.....	168
3.6. Le jeu d'instructions.....	169
3.7. Filtre à réponse impulsionnelle finie.....	175
<b>4. Evolution et diversité de la famille TMS320.....</b>	<b>176</b>
4.1. Architecture des TMS320C5x.....	176
4.2. Le jeu d'instructions.....	186
4.3. Les périphériques.....	190
4.4. Exemple de traitement numérique sur TMS320C5x.....	191
<b>VIII. EXEMPLES D'UTILISATION DE DSP EN COMMANDE DE MOTEURS.....</b>	<b>199</b>
<b>1. Choix du DSP et du système de développement.....</b>	<b>200</b>
1.1. Architecture du contrôleur DSP TMS320F240.....	200
1.2. Le système d'évaluation : 'C24x EVM.....	202
<b>2. Contrôle d'un moteur synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>206</b>
2.1. Présentation du système.....	206
2.2. Mesure et régulation.....	207
2.3. Mise en œuvre logicielle.....	209
<b>3. Contrôle d'un moteur sans capteur de position.....</b>	<b>218</b>
3.1. Présentation du système.....	218
3.2. Principes de la commande sans capteur de position.....	218
3.3. Organisation logicielle.....	222
<b>4. Transformation de Clarke et de Park sur TMS320F240.....</b>	<b>237</b>
<b>INDEX.....</b>	<b>241</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>243</b>