

10

MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR
Collection dirigée par Pierre BORNE

ÉLECTROTECHNIQUE

CONVERTISSEURS STATIQUES

**Méthodologie causale
de modélisation
et de commande**

**J.-P. HAUTIER
J.-P. CARON**

ÉDITIONS TECHNIP

ECT 38

10 MÉTHODES ET PRATIQUES DE L'INGÉNIEUR
Collection dirigée par Pierre BORNE
Professeur, Directeur scientifique de l'École Centrale de Lille

21971 $\frac{3}{5}$

ÉLECTROTECHNIQUE

CONVERTISSEURS STATIQUES

**Méthodologie causale
de modélisation
et de commande**



Jean-Paul HAUTIER

Agrégé de Génie Électrique
Professeur des Universités
Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique
de Puissance de Lille

Jean-Pierre CARON

Ancien élève de l'ENS Cachan
Agrégé de Physique Appliquée
Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique
de Puissance de Lille

Préface de Guy SÉGUIER

Professeur émérite des Universités
Université des Sciences et Technologies de Lille

1999



ÉDITIONS TECHNIP 27 RUE GINOUX 75737 PARIS CEDEX 15

Table des matières

Préface, Guy Séguier	V
Avant-propos	IX
1 FORMALISME POUR LA MODÉLISATION	1
1.1 Définitions	1
1.1.1 Processeur	2
1.1.2 Les relations de transformation	3
1.2 Les constituants élémentaires	5
1.2.1 Objets actifs	5
1.2.2 Objets accumulateurs simples	6
1.2.3 Objets dissipateurs simples	7
1.2.4 Objets coupleurs de puissance	8
1.2.5 Remarque	9
1.3 Règles d'association et de décomposition	9
1.4 La construction d'un graphe informationnel causal	12
1.4.1 La forme énergétique : le modèle GICe	12
1.4.2 La forme informationnelle : le modèle GICc	18
1.4.3 Opérations particulières	19
1.4.4 Commentaires	23
1.5 La continuité énergétique en topologie variable	24
1.6 Passage au schéma fonctionnel	26
1.6.1 Opérateurs de représentation	27
1.6.2 Exemple de référence	27
2 FORMALISME POUR LA COMMANDE	29
2.1 Les concepts du modèle inverse	30
2.1.1 Principes d'inversion	30
2.1.2 Généralisation : opérateurs de commande	32
2.1.3 Propriétés de l'inversion indirecte	39

2.2 Opérateurs auxiliaires d'estimation	41
2.3 Le modèle de comportement	46
2.4 Définition d'une structure globale	49
2.4.1 Méthodologie	49
2.4.2 Interprétation globale	52
3 CONCEPTS DE LA CONVERSION STATIQUE ÉLECTRONIQUE	57
3.1 L'interrupteur dipôle idéal	58
3.1.1 Définition	58
3.1.2 Commande d'un interrupteur	59
3.1.3 Représentation fonctionnelle dynamique	60
3.1.4 Classification des changements d'état	61
3.1.5 Directionnalité et commandabilité d'un interrupteur	64
3.2 Les composants physiques naturels	65
3.3 Les interrupteurs synthétisés	67
3.3.1 Association en série	67
3.3.2 Association en parallèle	69
3.4 Classification des interrupteurs	71
3.4.1 Les interrupteurs simples	71
3.4.2 Les éléments complexes	74
3.4.3 Modèle GIC d'un interrupteur	76
3.4.4 Modèle d'un interrupteur réel bicommandable	78
3.5 Analyse du transfert énergétique	80
3.5.1 Analyse du problème	80
3.5.2 Règle du transfert énergétique	85
3.6 Mise en œuvre des interrupteurs dipôles	87
3.7 La cellule de commutation	90
3.7.1 Genèse de la cellule de commutation	90
3.7.2 Cellules généralisées	92
3.7.3 L'interrupteur tripôle généralisé	96
3.7.4 Les contraintes de commutation	99
3.8 Les interrupteurs tripôles usuels	103
3.8.1 Le tripôle à transistors	103
3.8.2 Le tripôle à transistors duaux	107
3.8.3 Le tripôle bidirectionnel bicommandable	110

4 LES FONCTIONS DE CONVERSION	115
4.1 Position du problème	116
4.1.1 Séparation fonctionnelle	116
4.1.2 Fonction de conversion	117
4.2 Les structures matricielles	118
4.2.1 Matrice de connexions	118
4.2.2 Matrice des fonctions de connexion	121
4.3 Fonctions de conversion des structures matricielles	122
4.3.1 Définition des grandeurs caractéristiques	123
4.3.2 Conversion des tensions	124
4.3.3 Conversion des courants	126
4.3.4 Forme unique	127
4.3.5 Graphe informationnel	128
4.3.6 Mode de conduction interrompue	129
4.4 Application aux structures matricielles classiques	129
4.4.1 Convertisseur 2/2	130
4.4.2 Convertisseur 3/2	131
4.4.3 Convertisseur 2/3	132
4.4.4 Convertisseur 3/3	133
4.5 Propriétés des structures matricielles	134
4.5.1 Équivalence fonctionnelle	134
4.5.2 Les associations à fonctions multiniveaux	136
4.6 Les structures à cellules imbriquées	140
4.6.1 Principe des convertisseurs à cellules en série	140
4.6.2 Partie opérative généralisée	142
4.6.3 Commentaires	144
5 LES PRINCIPES POUR LA COMMANDE	145
5.1 Caractérisation du problème	145
5.2 Méthodologie de modélisation	147
5.2.1 Le modèle de connaissance	147
5.2.2 Le modèle de commande	152
5.2.3 Modèle de commande généralisé	154
5.3 Le modèle moyen instantané de commande	156
5.3.1 Fonctions génératrices	156
5.3.2 Caractérisation spectrale	158
5.3.3 Représentation du modèle moyen instantané	161

5.4 La commande indirecte	163
5.4.1 Définition	163
5.4.2 Méthodologie	163
5.4.3 Généralisation	168
5.4.4 Le modulateur de largeur d'impulsions	171
5.4.5 Le bloc algorithmique	176
5.5 La commande directe	182
5.5.1 Définition	182
5.5.2 Méthodologie	182
5.5.3 Performances	185
5.5.4 Limitation de la fréquence de commutation	186
5.6 La contrôle de la puissance	190
5.6.1 Architecture du système électrotechnique	190
5.6.2 Le contrôle de la puissance	193
5.6.3 Contrôle direct sans contrainte de forme	195
5.6.4 Contrôle direct avec contrainte de forme	200
5.6.5 Commentaire à propos des montages triphasés	204
6 CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES	205
6.1 Sources d'énergie électrique	205
6.1.1 Diversité des sources	205
6.1.2 Nature des sources	206
6.1.3 Réversibilité des sources	210
6.2 Puissances échangées entre une source sinusoïdale et un dipôle linéaire	212
6.2.1 Puissances instantanées, active et réactive	212
6.2.2 Définitions intégrales de la puissance réactive	215
6.2.3 Puissances complexe et apparente	217
6.3 Analyse harmonique des tensions et courants périodiques non sinusoïdaux	218
6.3.1 Séries de Fourier	219
6.3.2 Propriétés	220
6.3.3 Exemples	221
6.3.4 Autres paramètres caractéristiques	223
6.4 Puissances échangées par des grandeurs électriques alternatives non sinusoïdales	225
6.4.1 Puissance active	226
6.4.2 Puissance réactive	227

6.4.3 Exemple	227
6.4.4 Puissances apparente et déformante	229
6.5 Puissances dans les structures polyphasées	230
6.5.1 Expression générale des puissance active et réactive	230
6.5.2 Réseaux triphasés sans neutre	232
6.6 Puissance fluctuante et génération d'harmoniques par conversion statique	234
6.6.1 Redresseur M.L.I. à courant absorbé sinusoïdal	234
6.6.2 Harmoniques des courants de ligne générés par un redresseur PD3	240
6.7 Filtrage	242
6.7.1 Filtrage et réglage d'une source continue	242
6.7.2 Filtrage et réglage d'une source sinusoïdale	245
6.7.3 Filtrage inducto-capacitif	247
7 CONVERSION STATIQUE PAR COUPLAGE MAGNÉTIQUE	249
7.1 Description et conventions de signe	249
7.2 Modélisation dans l'hypothèse linéaire	251
7.2.1 Considérations énergétiques	251
7.2.2 Graphes informationnels de causalité	253
7.2.3 Modèles aux sources liées et aux inductances de fuites totalisées	255
7.2.4 Modèles ramenés au primaire et au secondaire	258
7.2.5 Application aux transformateurs à trois enroulements	259
7.3 Modélisation dans l'hypothèse de non linéarité	262
7.3.1 Expressions des flux d'induction	262
7.3.2 Relation entre le courant magnétisant et le flux commun	264
7.4 Transformateurs triphasés	267
7.4.1 Modèle causal du transformateur triphasé	268
7.4.2 Applications	270
8 EXEMPLES D'APPLICATION	277
8.1 Conditionneur de réseau	277
8.1.1 Description et modèle de connaissance	277
8.1.2 Modèles GICc moyen instantané et inverse	279

8.1.3 Synthèse des correcteurs	282
8.1.4 Résultats de simulation	283
8.2 Redresseur à absorption de courant sinusoïdal	285
8.2.1 Description et modèle de connaissance	285
8.2.2 Modèles GICc moyen instantané et inverse	288
8.2.3 Algorithmes de correction	291
8.2.4 Résultats expérimentaux et de simulation	293
Annexe : Les réseaux de Petri d'état interprétés	295
Références bibliographiques	301
Index	305

Collection Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur

Cette collection s'adresse aux élèves ingénieurs, aux étudiants de maîtrise et de DEA, ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens supérieurs en activité, désireux de rafraîchir ou compléter leur formation dans les sciences de l'ingénieur.

Convertisseurs statiques

Méthodologie causale de modélisation et de commande

J.-P. Hautier, J.-P. Caron

Les progrès technologiques concernant les interrupteurs électroniques de puissance et les composants de commande sont considérables. Ils permettent de construire des équipements apportant un réglage souple et contrôlé de l'énergie électrique.

Ce livre présente une méthodologie qui permet d'abord d'appréhender le fonctionnement particulier des convertisseurs électroniques de puissance, puis de définir les lois de leur commande dans un contexte donné d'application. Il complète utilement les ouvrages déjà existants sur le sujet ; en effet, il ne s'agit pas d'une classification de montages mais d'une proposition de formalisme simple et suffisamment général pour leur modélisation et leur commande.

Les principaux points abordés dans ce volume sont les suivants :

- La modélisation au moyen du Graphe Informationnel de Causalité (GIC). Cet outil, simple d'accès, oblige à réaliser l'analyse dans le strict respect de la causalité naturelle régissant tous les assemblages d'objets physiques.
- La commande qui tend toujours, quelle que soit la solution adoptée, à définir une loi inversant la causalité propre du processus commandé ; dans cet objectif, l'outil GIC se révèle systématique et structurant.
- Les concepts de la conversion statique électronique ; à partir de la notion de fonction de connexion, nous proposons une classification des interrupteurs et des cellules de commutation.
- Les fonctions de conversion des principaux montages avec la généralisation du modèle de la partie opérative de puissance.
- Les principes pour la commande avec l'introduction des fonctions génératrices de connexion ou connexions moyennes.
- La caractérisation et l'évaluation des grandeurs électriques, avec le rappel précis de toutes les notions fondamentales relatives à l'échange de puissance électrique entre des sources.
- La modélisation étendue au cas particulier du couplage magnétique car les transformateurs et les bobines occupent une place de tout premier rang dans les dispositifs de conversion d'énergie électrique.

L'ouvrage est abondamment illustré et les propositions sont développées sur la base d'exemples significatifs permettant au lecteur l'assimilation rapide des concepts proposés. Le dernier chapitre est une application de la méthodologie à deux cas particuliers de systèmes de conversion.

Jean-Paul Hautier, Professeur des universités à l'ENSAM (Centre de Lille), agrégé de génie électrique, est responsable de l'équipe «Commande des systèmes électriques» du Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille (L2EP).

Jean-Pierre Caron est Professeur agrégé de physique appliquée à l'ENSAM (Centre de Lille) et membre du Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille (L2EP).



ISBN 2-7108-0745-9