

Rapport de synthèse
présenté à
L'Université Lille1 Sciences et Technologies
en vue d'obtenir
L'Habilitation à Diriger des Recherches

présentée et soutenue publiquement par

KESTELYN Xavier

le 05 Décembre 2012

FORMALISME VECTORIEL
et **REPRESENTATION GRAPHIQUE CAUSALE**
pour la **COMMANDE des SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES**
à **ENTREES MULTIPLES et DYNAMIQUES COUPLEES**

Membres du jury rapporteurs :

M. Christophe ESPANET	Professeur des Universités à l'Université de Franche-Comté
M. Pascal MAUSSION	Professeur des Universités à l'Université de Toulouse
M. Farid MEIBODY-TABAR	Professeur des Universités à l'Université de Lorraine

Membres du jury examinateurs :

M. Jean-Paul HAUTIER	Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech
Mme. Betty LEMAIRE-SEMAIL	Professeure des Universités à l'Université Lille 1
M. Emil LEVI	Professor at Liverpool John Moores University
M. Eric SEMAIL	Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech

Remerciements

Mes travaux de recherche exposés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Centre d'Enseignement et de Recherche de Lille d'Arts et Métiers ParisTech dans l'équipe « Commande » du L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille) dirigé par M. Francis PIRIOU.

Je tiens à remercier particulièrement :

Monsieur Jean-Paul HAUTIER, Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech, pour m'avoir fait l'honneur et m'avoir offert le grand plaisir de présider mon jury d'habilitation. J'ai enfin eu l'occasion de découvrir l'homme de grande valeur après avoir rencontré un directeur de laboratoire et directeur général très occupé.

Messieurs Christophe ESPANET, Professeur des Universités à l'Université de Franche-Comté, Pascal MAUSSION, Professeur des Universités à l'Université de Toulouse et Farid MEIBODY-TABAR, Professeur des Universités à l'Université de Lorraine, pour avoir accepté la lourde charge de rapporteurs de mon mémoire. Leurs analyses et questions pertinentes m'ont permis d'affiner ma pensée afin de mieux formaliser mes perspectives de recherche.

Monsieur Emil LEVI, Professor at Liverpool John Moores University, pour avoir accepté sans hésitation de traverser la Manche afin d'assister à ma soutenance en tant qu'examinateur. Je connaissais le scientifique brillant et internationalement reconnu, j'ai eu la chance de découvrir l'homme plein de bienveillance et de chaleureux conseils.

Madame Betty LEMAIRE-SEMAIL, Professeure des Universités à l'Université Lille 1 et responsable de l'équipe « Commande » du L2EP pour avoir accepté d'être ma caution scientifique ainsi que pour son soutien sans failles et ses encouragements réguliers.

Monsieur Eric SEMAIL, Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech, guide depuis les premiers jours et collègue depuis mon arrivée au CER de Lille, sans lequel je n'aurais certainement jamais pu présenter ce mémoire. Pour paraphraser un proverbe bouddhiste, « Quand je suis prêt (l'élève), Eric apparaît (le maître) ».

Monsieur Pierre-Jean BARRE, Professeur des Universités à Arts et Métiers ParisTech, qui m'a énormément appris sur les « façons de faire » et a toujours su me donner les impulsions nécessaires, et de surcroît au bon moment, pour me surpasser.

Messieurs Julien GOMAND, Yvan CREVITS, Ivan GARCIA-HERREROS, Li LU et Paul SANDULESCU que j'ai eu le plaisir de co-encadrer lors de leurs travaux de thèse. Véritable cheville ouvrière de mes activités de recherche, ils retrouveront dans ce mémoire leurs contributions respectives.

L'ensemble des directeurs, collègues, personnels, acteurs industriels, étudiants et élèves que j'ai pu rencontrer depuis ma nomination en tant que professeur certifié et agrégé au lycée de l'Europe à Dunkerque, puis à l'IUT GEII de Villeneuve d'Ascq, ainsi que depuis ma nomination à Arts et Métiers ParisTech en tant que maître de conférences et membre du L2EP. Qu'ils ne soient pas déçus de ne pas voir apparaître leur nom dans ces remerciements, oublier un nom serait les oublier tous.

Je ne saurais terminer sans une pensée à mes parents qui m'ont toujours fait confiance et laissé faire ce que je pensais être bon, et à mon épouse et mes enfants qui ont beaucoup subi sans comprendre toujours ce qui pouvait m'animer durant ces dernières années. Qu'ils reçoivent toute mon affection et ma reconnaissance.

Résumé

Mots clés : Systèmes électromécaniques à entrées multiples – Dynamiques couplées – Théorie des vecteurs d'espace multidimensionnels – Graphe Informationnel Causal (GIC) – Représentation Energétique Macroscopique (REM)

La multiplication de sous-systèmes identiques décentralisés mais couplés, de puissance réduite, en lieu et place d'un système central de forte puissance, permet de doter les systèmes de degrés de libertés recherchés dans le développement de produits et processus compétitifs. Les entraînements électriques polyphasés et les systèmes de positionnement multi-actionnés sont des exemples de systèmes électromécaniques modernes et probants.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire portent sur la représentation et la commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples et présentant des couplages énergétiques internes forts par une approche méthodologique basée sur les outils « Modélisation Physique Vectorielle » et « Représentation Graphique Causale et Energétique ». Un espace vectoriel associé au système permet de réaliser des modèles vectoriels à paramètres physiques, de complexités choisies différentes suivant les exigences. Le formalisme vectoriel permet à la fois des représentations géométriques synthétiques et une simplification des calculs à l'aide d'opérateurs tels que les produits scalaires, vectoriels ou mixtes. La représentation graphique du modèle, causale et énergétique, permet d'une part d'examiner les conditions permettant la commandabilité du système et, d'autre part, d'en déduire des architectures de commande par inversion du modèle, autant en boucle fermée qu'en boucle ouverte.

Un des points forts de l'approche réside dans le fait de représenter le système réel à entrées multiples et couplages énergétiques internes forts par un ensemble de systèmes fictifs mono-entrée découplés. L'architecture de commande déduite permet alors une gestion plus aisée des énergies stockées, une aide au fonctionnement en mode dégradé, ainsi que l'utilisation de correcteurs simples et faciles à régler, car chacun assigné à un objectif unique. De multiples applications de la méthodologie proposée ont été expérimentées sur des bancs prototypes équipés de systèmes électromécaniques à entrées multiples présentant des couplages magnétiques (machines synchrones polyphasées), électriques (onduleurs multi-bras) et mécaniques (systèmes de positionnement multi-actionnés configurés en gantry).

Une perspective privilégiée des travaux proposés concerne le fonctionnement des systèmes électromécaniques à leurs limites, en particulier par la prise en compte et la gestion des saturations des grandeurs de réglage et des non-linéarités intrinsèques.

Abstract

Keywords: Electromechanical systems with multiple inputs – Coupled dynamics – Multidimensional space vector theory – Causal Ordering Graph (COG) – Energetic Macroscopic Representation (EMR)

Replacing a powerful central system with several identical low-power coupled subsystems affords degrees of freedom that are looked for in the development of competitive products and processes. Multi-phase drives and multi-actuated positioning systems are up-to-date and convincing examples.

The research works presented in this dissertation deal with the representation and control of electromechanical systems with multiple inputs and internal energetic strong couplings using a methodological approach based on the “Physical Space Vector Modelling theory” and the “Graphical Causal Energetic Representation”.

A space vector, associated with the system to be modelled, makes it possible to build models with physical parameters that have different complexities depending on the requirements. The vector formalism allows synthetic graphical representations and computation simplifications with the use of vector operators such as dot, cross and mixed products. The graphical representation of the model, causal and energetic, makes it possible on the one hand to examine the necessary conditions for the controllability of the system and, on the other hand, to deduce feedforward and feedback control structures.

A strong point of the approach lies in the fact that a real system, having multiple inputs and strong energetic couplings, can be modelled by a set of decoupled fictitious single-input systems. The control structure, which is deduced from the model, facilitates the control of stored energies, helps to run the system in fault mode and makes it possible to use simple and easy-to-tune controllers, since each of them is assigned to a unique objective.

Numerous applications of the proposed methodology have been experimented on prototype test beds, which are equipped with electromechanical systems with multiple inputs and have strong magnetic couplings (multiphase synchronous machines), electric couplings (multi-leg voltage source inverters) and mechanical couplings (multi-actuated positioning gantry systems).

A preferred perspective of the proposed works concerns systems working close to their limits, taking into account the control of input limits and intrinsic nonlinearities.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	6
Table des matières	7
Liste des tableaux	9
Première partie Curriculum Vitae et Rapport d'activité.....	15
Deuxième partie Contexte et Positionnement des Travaux de Recherche.....	35
1. Les systèmes électromécaniques à entrées multiples	36
1.1 Présentation et intérêt.....	36
1.1.1 Terminologie choisie.....	36
1.1.2 Qualités attendues des systèmes électromécaniques	36
1.2 Les deux groupes de systèmes applicatifs retenus	38
1.2.1 Ensembles convertisseur-machine polyphasés	38
1.2.2 Robot de type Gantry	53
2. Modélisation physique vectorielle	60
2.1 Préambule	60
2.2 Processus de modélisation	62
2.3 Pourquoi utiliser un formalisme vectoriel ?	67
2.3.1 Intérêt du formalisme vectoriel.....	67
2.3.2 Vecteur d'espace de dimension n	68
2.3.3 Exemple dans le cas d'un système à 5 dimensions	68
3. Représentation graphique causale et énergétique en vue de la commande	70
3.1 Bilan des outils classiques	70
3.2 Particularité des formalismes GIC et REM	71
4. Conclusion	74
Troisième partie Contributions à la modélisation et à la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées.....	77
1. Le contexte local.....	78
1.1 Formalisme pour la commande des Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM) [Boucscayrol03].....	78
1.2 Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace aux systèmes polyphasés [Semail00] [Semail09]	79
1.3 Formalisme pour la commande des entraînements à dynamique élevée [Barre04]	79

2.	Contributions	81
2.1	Contributions à la modélisation des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées	82
2.1.1	Modélisation des ensembles polyphasés	82
2.1.2	Modélisation des ensembles polyphasés en mode dégradé d'alimentation	90
2.1.3	Modélisation des systèmes gantry bi-actionnés	93
2.2	Contributions à l'enrichissement des formalismes GIC et REM	98
2.2.1	Commandabilité et observabilité structurelles d'un modèle	98
2.2.2	Ordre d'un système	99
2.2.3	Calcul de fonctions de transfert. Résonances et antirésonances.....	99
2.2.4	Intérêt de la déduction d'une architecture de commande en boucle ouverte.....	99
2.3	Contributions à la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées	101
2.3.1	Commande par inversion	101
2.3.2	Stratégies vectorielles de commande d'un onduleur polyphasé	108
2.3.3	Défluxage des ensembles polyphasés	109
Quatrième partie Perspectives		113
1.	Aller oui, mais vers où ?.....	114
2.	Les axes de recherche futurs	116
2.1.	Enrichissement du formalisme	116
2.2.	Anti-emballement et défluxage	116
2.3.	Approche paramétrique pour la robustesse.....	117
2.4.	Modélisation modale et commande non-linéaires.....	117
Bibliographie		121

Liste des tableaux

Tableau 1: Récapitulatif des différentes configurations de machines polyphasées [Klingshirn85].....	40
Tableau 2 : Différentes inductances associées à une machine polyphasée et son groupe harmonique caractéristique [Klingshirn85].....	43
Tableau 3 : Différents types de modèles et leurs types opposés.....	62
Tableau 4 : Différentes grandeurs potentielles et cinétiques considérées.....	65
Tableau 5 : Différentes variables généralisées.....	66
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des groupes harmoniques associés aux machines polyphasées à 3, 5 et 7 phases.....	89
Tableau 7 : Contenu harmonique des coefficients de la matrice des dipôles ouvrants dans une base de Park généralisée	92

Liste des figures

Figure 1 : Schémas équivalents à une machine polyphasée asynchrone [Klingshirn83-1].....	42
Figure 2 : Représentation des différents vecteurs d'espace alimentant les trois circuits diphasés équivalents à une machine à six phases [Zhao95]	45
Figure 3: Différents défauts associés à un bras d'onduleur: (a) court-circuit d'un interrupteur, (b) court-circuit d'un bras d'onduleur, (c) ouverture d'un interrupteur, et (d) ouverture d'une phase [Welckho04].	45
Figure 4 : Représentation schématique d'un ensemble polyphasé [Wilamowski11].	49
Figure 5 : Robots (a) antropomorphe - série et (b) araignée - parallèle	53
Figure 6 : Représentation des configurations (a) mono-actionnée et (b) bi-actionnée d'un robot en gantry.....	54
Figure 7 : Différents modèles de gantry bi-actionnés rencontrés dans la littérature.....	56
Figure 8 : Représentation schématique des structures de commande des axes de façon : (a) indépendante, (b) par découplage ou (c) modale (découplante)	59
Figure 9 : Synoptique d'un système à commander.....	60
Figure 10 : Exemple de système à modéliser	63
Figure 11 : Onduleur de tension n-phasé à n bras	83
Figure 12 : Représentation Energétique Macroscopique d'un ensemble onduleur-machine synchrone polyphasé.....	85
Figure 13 : Représentation vectorielle des tensions issues d'un onduleur à trois bras.....	86
Figure 14 : Equivalence entre une machine n-phasée et un ensemble de machines fictives mono et diphasées couplées mécaniquement	88
Figure 15 : Représentation REM d'un ensemble convertisseur-machine n-phasé aux valeurs moyennes en une somme de sous-systèmes fictifs	89
Figure 16 : Concept de dipôle ouvrant.....	90
Figure 17 : REM d'un ensemble polyphasé, valable en mode normal comme dégradé.....	91
Figure 18 : Différentes granularités de modèle d'un gantry bi-actionné dont la poutre est supposée rigide.....	93
Figure 19 : Représentations GIC de différents modèles de systèmes en gantry bi-actionnés.....	94
Figure 20 : Modèle à éléments localisés et répartis d'un gantry bi-actionné dont la poutre est supposée flexible	95
Figure 21 : REM d'un système gantry bi-actionné dans une base modale	97
Figure 22 : Exemple de commande en boucle ouverte d'un axe de robot	101

Figure 23 : Représentation REM d'un gantry bi-actionné et de ses structures de commande en boucle ouverte (ff) et fermée (fb)	102
Figure 24 : REM d'une machine polyphasée et structure de commande déduite.....	104
Figure 25 : Représentation 3D de l'influence de la tension homopolaire sur l'excursion maximale de la tension dans la machine principale [TH5].	110

Introduction

Ce document présente la majeure partie de mes activités d'enseignements et de responsabilités collectives, démarrées dès 1993, année de ma première affectation en lycée technique en tant que professeur certifié de génie électrique, ainsi que mes activités de recherche, principalement démarrées depuis mon stage de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en 1999 et axées sur la modélisation et la commande d'une machine à réluctance variable. Mes activités de recherche ont ensuite été confirmées par une thèse sur la modélisation et la commande de machines polyphasées soutenue en 2003. Depuis ma nomination comme Maître de Conférences au Centre d'Enseignement et de Recherche Arts et Métiers ParisTech de Lille en septembre 2004, je suis membre permanent du L2EP.

Mes travaux de recherche concernent la modélisation et la commande de systèmes électromécaniques possédant un nombre importants d'entrées, induisant de forts couplages par la constitution physique même du système. Ces travaux ont toujours été appliqués sur (et d'ailleurs souvent induits par) différents dispositifs industriels, tant de nature électrique que mécanique. Mes démarches sont principalement de nature méthodologique, c'est-à-dire qu'à partir de problématiques appliquées particulières, j'ai ainsi contribué, par l'expérience, à enrichir une méthodologie amorcée lors de mes travaux de thèse, et permettant de proposer des solutions standards et génériques à un certaine classe de problèmes. Cette particularité méthodologique, fruit d'un échange permanent entre outils et applications, est caractéristique de l'équipe « Commande » du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille dont je fais partie depuis le début de mes activités de recherche.

Ce mémoire est organisé en quatre parties.

Dans la première partie, sont synthétisées ma carrière, mes activités scientifiques, pédagogiques et de responsabilités collectives.

La deuxième partie commence par une définition et une revue des avantages inhérents aux systèmes électromécaniques à entrées multiples. On montre ensuite, par le biais de deux groupes applicatifs distincts, quels outils et méthodes ont été développés dans la littérature pour aider à la résolution des verrous posés par ces systèmes complexes. On conclût cette partie en constatant, de notre point de vue, un manque d'outils méthodologiques qui permettraient de résoudre les

problèmes rencontrés de façon plus systématique et unifiée. La modélisation physique vectorielle et la Représentation Energétique Macroscopique (REM) sont introduites et présentées comme des candidates intéressantes à l'étude de ces systèmes électromécaniques complexes.

La troisième partie montre, ayant résolument fait le choix de la modélisation physique vectorielle et de la Représentation Energétique Macroscopique, comment nous avons contribué à la modélisation et la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples. Par le biais des thèses co-encadrées, des articles scientifiques, chapitres d'ouvrages et communication diverses publiées, nous présentons un résumé des méthodes originales que nous avons développées et des résultats qu'elles ont permis d'obtenir.

Enfin la quatrième et dernière partie de ce mémoire est consacrée aux différents travaux qui seront menés, afin de développer les outils permettant de répondre de façon efficace aux besoins émergents associés aux systèmes électromécaniques à entrées multiples.

Première partie

Curriculum Vitae et Rapport d'activité

KESTELYN Xavier Maurice Marc

Né le 27 Mars 1971 à Dunkerque (Nord-France) – Nationalité française
Marié – Deux enfants – Maître de conférences Hors Classe 63^{ème} section
Laboratoire L2EP – Arts et Métiers ParisTech
Centre d'Enseignement et de Recherche de Lille
8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France



Diplômes

1992 : Licence d'Ingénierie Electrique, Université des Sciences et Technologie de Lille 1
1994 : Certificat d'Aptitude Professionnelle à l'Enseignement Technique en Génie Electrique
1998 : Agrégation externe de Génie Electrique
1999 : Diplôme d'Etudes Approfondies, Université des Sciences et Technologie de Lille 1. "*Switched Reluctance Motor Modelling using an Orthogonal Neural Network*"
2003 : Doctorat de Génie Electrique, Université des Sciences et Technologie de Lille 1. "*Vectorial Multi-Machine Modelling for Control of Multi-phase Drives*"

Expériences professionnelles

1994-2002 : Professeur Certifié puis Agrégé de Génie Electrique, Lycée de l'Europe Dunkerque, France
1998-2009 : Enseignant vacataire à l'Ecole Centrale de Lille, l'Institut de Génie Informatique et Industriel de Lens, l'Institut Technologique Européen d'Entrepreneuriat et de Management et l'Ecole Navale de Brest.
2002-2004 : Professeur Agrégé de Génie Electrique, IUT A de Lille, Département Génie Electrique et Informatique Industrielle
Depuis 2004 : Maître de Conférences en Génie Electrique à Arts et Métiers ParisTech CER de Lille

Informations complémentaires

Depuis 2006 : Correspondant relations internationales « pays nordiques et baltes » au centre Arts et Métiers ParisTech de Lille. Validation des programmes d'études des élèves sortants et mise à jour des programmes en place et recherches/mises au point de programmes bi-diplômants.

Depuis 2010: Membre suppléant élu du conseil d'administration d'Arts et Métiers ParisTech (8 centres et trois instituts).

Depuis 2011 : Responsable du Master Recherche international bi-diplômant KIMP (Knowledge Integration in Mechanical Production) qui possède deux parcours : Advanced Production Systems (APS) au centre Arts et Métiers ParisTech de Lille et Design and Manufacturing (DM) au centre Arts et Métiers ParisTech de Paris). Responsable pédagogique du parcours APS. Définition du programme de la formation en partenariat avec les homologues suédois et mise en place de sujets de recherche communs. Gestion des intervenants.

Ceinture orange de Tai-Jitsu et pratique régulière du footing.

Synthèse de ma carrière

Mes activités d'enseignement

De 1994 à 2002 j'ai été successivement professeur certifié en génie électrique (charge d'enseignement de 18h/semaine) puis agrégé en génie électrique (15h/semaine) au Lycée Général Scientifique et Technologique de l'Europe à Dunkerque. Pendant ces années, j'ai d'abord enseigné en baccalauréat Sciences et Technologies en Electrotechnique (Cours et Travaux Pratiques en Electrotechnique et Automatismes Industriels) et été examinateur au baccalauréat en génie électrotechnique. Devenu professeur agrégé en 1998, j'ai pris la responsabilité des cours de génie électrique de la nouvelle section du baccalauréat Scientifique Sciences de l'Ingénieur S-SI et été président de jury du Baccalauréat S-SI de 1998 à 2002.

Durant mes années de professeur agrégé (1998-2002), j'ai désiré découvrir le monde de l'enseignement supérieur et enseigné des TP en tant que vacataire à l'école Centrale de Lille (ECL) et à l'Institut de Génie Informatique et Industriel de Lens (IG2I) à raison de 50h en moyenne par an.

Enthousiasmé par les expériences d'enseignement et de recherche vécues dans le supérieur, j'ai été recruté sur un poste de professeur agrégé en génie électrique à l'IUT A de Villeneuve d'Ascq dans le département de Génie Electrique et d'Informatique Industrielle (GEII) en 2002. Ma charge d'enseignement était de 384h équivalent TD par an. J'ai, durant cette période, enseigné l'électrotechnique, les automatismes et été responsable du module d'Études et Réalisations (démarche d'enseignement par projets).

En septembre 2004, j'ai été recruté en tant que maître de conférences (192h équivalent TD/an) à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (Arts et Métiers ParisTech - Centre d'Enseignement et de Recherche (CER) de Lille). J'ai consacré une partie importante de mon temps à la mise en place du nouveau programme de Formation d'Ingénieur en Technologie pour l'Europe et fait partie, de 2008 à 2011, de l'équipe élaborant les sujets de concours et corrigeant les copies de l'épreuve de Sciences Industrielles du concours commun E3A PSI.

En lien direct avec mes thématiques de recherche et parallèlement aux enseignements que j'ai prodigués aux 1^{ère} et 2^{ème} années de la formation initiale :

- J'ai développé et enseigné un cours de « Machines électriques » au nouvel Institut Technologique Européen d'Entrepreneuriat et de Management (8h CM/an et 12h TD/an de 2004 à 2007) ;

- J'ai mis en place et enseigné un cours de « Propulsion Electrique » aux élèves officiers de l'Ecole Navale (12h de CM/an de 2005 à 2010) ;

- J'ai enseigné un cours de « Modélisation et commande des systèmes électromécaniques » dans le master Energie électrique et Développement Durable (12h CM/an de 2006 à 2008) ;

- J'ai créé la formation terminale « ASE: Agile Systems Engineering » (14 étudiants en moyenne par an) et enseigné dans cette formation (20h CM/an de 2006 à 2010) ;

- j'étais responsable de module et j'ai enseigné dans le Mastère Spécialisé «Technologies des Systèmes Hybrides de Production d'Electricité et de Chaleur » (12h CM/an de 2007 à 2010) et je suis responsable de module et j'enseigne dans le Master/Mastère Spécialisé «Maitrise de l'Energie des Véhicules Electriques : du Réseau de distribution à la Roue » (24h CM/an depuis 2010).

Etant correspondant relations internationales « pays nordiques et baltes » depuis 2006 et responsable du Bureau des Relations Internationales (BRI) du centre de Lille de 2010 à 2012 (à ce titre je bénéficiais d'une décharge de 96h équivalent TD/an), j'ai acquis une bonne expérience dans les relations internationales. Ceci m'a, en septembre 2010, encouragé à transformer l'année terminale ASE en un parcours « Advanced Production Systems » du Master en langue anglaise « Knowledge Integration in Mechanical Production » (KIMP).

J'ai enfin accepté depuis septembre 2011 la responsabilité du Master international bi-diplômant KIMP doté de deux parcours (50 élèves dont 30% d'étrangers de 13 nationalités différentes).

Mes activités de recherche

Mes activités de recherche commencent en 1999 avec la préparation et l'obtention d'un Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) de génie électrique à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) au laboratoire L2EP. En décembre 2003, j'ai soutenu ma thèse de doctorat, dirigée par le Professeur Jean-Paul Hautier et intitulée « *Modélisation Vectorielle Multi-Machine pour la Commande des Ensembles Convertisseurs-Machines Polyphasés* », à la suite de laquelle j'ai été qualifié à la fonction de maître de conférences en 2004.

J'ai été recruté à Arts et Métiers ParisTech pour développer des activités de recherche dans le domaine de la modélisation et de la commande des machines de production. J'ai ainsi intégré une Equipe de Recherche Technologique (ERT int 1022-CommandE des Machines-Outils à DYNamique Elevée). J'ai adapté les outils développés initialement durant ma thèse pour l'étude des systèmes polyphasés à celle des machines de production multi-actionnées. Dans cette thématique, j'ai co-encadré 4 thèses de Masters et 2 de Doctorat, déposé un brevet et publié 2 revues internationales, co-rédigé 6 actes de congrès internationaux et 2 nationaux.

Poursuivant ma thématique de recherche initiée durant ma thèse sur les systèmes polyphasés, j'ai été chairman de 3 sessions spéciales et j'ai organisé une session spéciale en 2010. J'ai contribué à l'organisation et participé à 2 écoles d'été et à 2 congrès internationaux. Depuis ma

thèse, j'ai été membre de trois GdR successifs et co-responsable du projet interne ACCORD au GdR SEEDS. J'ai co-rédigé deux chapitres dans les traités EGEM (35 et 50 pages) qui ont été aussi publiés en anglais aux éditions Wiley. Dans cette thématique j'ai co-encadré 4 thèses de Master et 3 de Doctorat, publié 9 revues internationales, 25 actes de congrès internationaux et 3 nationaux, et 5 actes de GdR ou d'écoles d'été.

J'ai évalué 16 articles de congrès et de revues, ainsi qu'une demande de subvention à la découverte pour le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. J'ai aussi durant ces années, valorisé mes activités de recherche par le biais de 6 actions de transfert pour un montant de plus de 600 k€.

Je bénéficie enfin de la Prime d'Excellence Scientifique (PES) depuis 2009.

Mes responsabilités collectives

De 2005 à 2010, je fus membre titulaire élu du conseil d'administration du centre Arts et Métiers ParisTech de Lille et, de 2006 à 2010, membre titulaire élu du conseil de laboratoire du L2EP. Je suis depuis 2010 membre suppléant élu du Conseil d'Administration d'Arts et Métiers ParisTech. A ce titre, je suis membre de droit du Conseil d'Administration restreint aux enseignants-chercheurs.

J'ai été, de 2007 à 2008, membre extérieur de la commission de spécialistes 63ème section de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

Enfin, j'ai fait partie, de 2008 à 2011, de l'équipe participant à l'élaboration du sujet et à la correction des copies du concours commun E3A PSI en sciences de l'ingénieur permettant, entre autres, le recrutement des élèves candidats à l'entrée à Arts et Métiers ParisTech.

Activité scientifique

Présentation des thématiques de recherche : grands axes de recherches et apport dans le ou les domaines concernés

Mes thématiques de recherche mises en œuvre au sein du L2EP et d'Arts et Métiers ParisTech sont centrées autour de la modélisation physique vectorielle et de la représentation graphique causale de systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées. Cette méthodologie permet en particulier de déduire des architectures de commande de façon systématisée.

Mes thématiques de recherche sont en lien direct avec le besoin de maintien de la compétitivité des industries, qui nécessite le développement de processus et de produits performants. Je suis particulièrement sensibilisé à ce point depuis mon recrutement en tant que maître de conférences à Arts et Métiers ParisTech. En effet, recruté pour développer des activités de

recherche dans le domaine de la modélisation et de la commande des machines de production, j'ai intégré l'Equipe de Recherche Technologique Cemodyne (ERT int 1022-CommandE des Machines-Outils à DYNamique Elevés). Dès les premiers mois, j'ai travaillé essentiellement à saisir les verrous scientifiques et technologiques ainsi que les problématiques spécifiques attenantes à ces systèmes. J'ai en particulier adapté les outils que j'avais développés initialement durant ma thèse pour l'étude des systèmes polyphasés à l'étude des machines de production multi-actionnées.

La multiplication de sous-systèmes identiques décentralisés mais couplés, de puissance réduite, en lieu et place d'un système central de forte puissance, permet de doter les systèmes électromécaniques de propriétés nécessaires à atteindre un haut niveau de performance (rendement, puissance volumique, dynamique, fiabilité, modularité). Les entraînements électriques polyphasés (à plus de trois phases) ou les systèmes de positionnement multi-actionnés en sont des exemples modernes probants.

Il apparaît que, dans la majorité des réalisations industrielles, le contrôle de chaque sous-système soit réalisé de façon indépendante, c'est-à-dire sans modéliser le couplage entre ces éléments. Or, il est indéniable que des performances optimales ne peuvent être obtenues qu'en prenant l'ensemble du système en compte (démarche systémique). Le verrou scientifique devient donc celui de la modélisation et de la commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées, où la gestion précise des énergies stockées et échangées est essentielle pour conserver l'intégrité de l'ensemble ainsi que pour obtenir ses performances optimales.

Si nombre de travaux ont déjà été réalisés et publiés sur la modélisation et la commande de systèmes à Entrées Multiples et Sorties Multiples (MIMO), les recherches menées au sein de l'équipe « Commande » du L2EP ont montré la nécessité d'une gestion locale des grandeurs physiques qui permettent de définir l'état énergétique d'un système électromécanique (variables d'état physiques liées aux flux d'énergie présents dans les systèmes). Mes travaux de recherche portent donc sur la représentation et la commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples par une approche méthodologique. J'ai particulièrement travaillé à contribuer au développement des outils de modélisation physique vectorielle et de représentation causale et énergétique ainsi qu'à la déduction d'architectures de commande.

Une particularité de l'approche que nous proposons réside dans le fait de représenter le système réel à entrées multiples, présentant des couplages, par un ensemble de systèmes fictifs mono-entrée découplés. L'architecture de commande en boucle fermée ainsi déduite permet alors

une gestion plus aisée des énergies, du fonctionnement en mode dégradé ainsi que l'utilisation de correcteurs simples et faciles à régler, étant chacun assigné à un objectif unique (contrôle d'une seule variable d'état). Dans le cas de systèmes dont on connaît les grandeurs de références à l'avance (systèmes aux opérations préprogrammées), l'approche proposée permet la déduction méthodologique d'une architecture de commande en boucle ouverte (Feedforward).

Les résultats de ces travaux, en partie réalisés lors des 8 mémoires de Masters et des 5 thèses co-encadrées de Doctorat, ont été mis en œuvre et systématiquement démontrés sur des bancs expérimentaux équipés de systèmes électromécaniques présentant des couplages magnétiques (machines polyphasées), mécaniques (systèmes de positionnement multi-actionnés configurés en gantry) ou électriques (onduleurs multi-bras). La validation expérimentale des travaux développés a aidé à leur valorisation par transfert vers l'industrie (chiffre d'affaire de plus de 600k€) .

Un domaine d'application privilégié de la méthodologie proposée concerne le développement de véhicules autonomes à électrification partielle (véhicules hybrides) et totale (véhicules électriques). Ce développement se heurte au problème de l'autonomie qui se trouve être limitée par la quantité d'énergie stockée et par son utilisation optimale. Une des pistes intéressantes permettant un gain en masse et volume concerne la réduction des surdimensionnements des composants, surdimensionnements réalisés systématiquement pour accroître la tolérance aux pannes. Cette réduction amène d'une part à travailler aux limites des capacités des éléments, entraînant des comportements fortement non-linéaires, et d'autre part au développement de systèmes à degrés de liberté redondants autorisant un fonctionnement en mode dégradé. Les outils développés ces dernières années, dans le cadre de mes thématiques de recherche, proposent donc des alternatives intéressantes pour résoudre ces problèmes émergents.

Présentation, en quelques lignes, des 5 publications (ou brevets, éditions de logiciels) jugées les plus significatives

J'ai la volonté d'équilibrer mes publications entre chapitres d'ouvrages scientifiques (au nombre de 5 référencées [OSx]), revues internationales (11 référencées [RIx]), actes de congrès (34 congrès internationaux référencés [CIx] et 5 nationaux référencés [CNx]) et rédaction de brevets (1 brevet référencé [BR1]). Les écoles d'été qu'organise l'équipe « Commande » du laboratoire L2EP et les Groupements de Recherche (GdR) sont pour moi des occasions d'échanger efficacement avec des collègues d'autres établissements et d'assurer la transmission des savoirs et savoir-faire spécifiques développés dans notre équipe (5 actes repérés [DIVx]).

Les cinq publications présentées ci-après sont un exemple du type de publications que je privilégie. Elles portent sur les systèmes polyphasés et les systèmes électromécaniques multi-actionnés.

[OS4] *"Multiphase Voltage source Inverters"*, Chapter 8 of *"Power electronic Converters - PWM Strategies and current control techniques"*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc (<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1848211953.html>), pages. 203-242, ISBN. 978-1-84821-195-7, 3-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

[RI10] *"A Vectorial Approach for Generation of Optimal Current References for Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machines in Real-time"*. IEEE Transactions on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vol. 58, N°. 11, pages. 5057 - 5065 ISBN. 0278-0046, 2-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL.

[RI9] *"Modélisation causale pour la commande auto adaptée de machines alternatives triphasées en mode dégradé"*, EJEE, European Journal of Electrical Engineering (<http://ejee.revuesonline.com/>), Vol. 13, N°. 3, 6-2010, Yvan CREVITS, Xavier KESTELYN, Betty LEMAIRE-SEMAIL, Eric SEMAIL

[BR1] *"Système de régulation d'un portique à double moyen d'entraînement"*, Institut National de la Propriété industrielle

(<http://fr.espacenet.com/publicationDetails/biblio?KC=A1&date=20091113&NR=2930936A1&DB=fr.espacenet.com&locale=fr FR&CC=FR&FT=D>), N° de Brevet. FR 2 930 936 - B1, 8-2010, Julien GOMAND, Xavier KESTELYN, Pierre-Jean BARRE

[DIV5] *"EMR and inversion-based control of gantry systems"*, International Workshop on Energetic Macroscopic Representation, EMR'11 (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), 07-2011, Lausanne, Switzerland, Xavier KESTELYN, Ivan GARCIA-HERREROS

Encadrement et animation recherche

Session Chairs – Special Sessions

Maintenant bien identifié dans le domaine des systèmes polyphasés, j'ai organisé et j'ai été invité à des sessions spéciales dédiées à cette thématique.

[CH4] Co-chairman d'une session spéciale *« Special Session on Multiphase Drives: Design, Control, Fault Tolerance and Applications »* au congrès IEEE-ISIE 2010, 4 au 7 Juillet 2010, Bari, Italie. 8 papiers présentés.

[CH3] Organisateur d'une session spéciale *« Multiphase Drives for Vehicle Power and Propulsion »* et chairman de cette session au congrès IEEE-VPPC 2010, 3 au 5 septembre 2010, Lille, France. 7 papiers présentés.

[CH2] Chairman d'une session au congrès IET *« Colloquium on Reliability In Electromagnetic Systems »*, 24 et 25 Mai 2007, Paris, France. 8 papiers présentés.

[CH1] Chairman d'une session au congrès IEEE-IEMDC, 3 au 5 mai 2007, Antalya, Turquie. 6 papiers présentés.

Participation à l'organisation de congrès, d'écoles d'été :

[OC4] Membre du comité d'organisation du congrès IEEE VPPC 2010, 3 au 5 mai 2010, Lille, France. Accueil des 376 participants (Registration board) et aide à la logistique permettant la tenue des présentations orales et des workshops.

[OC3] Membre du comité d'organisation du congrès LDIA 2007, 16 au 19 septembre 2007, Lille, France. Aide à la logistique permettant la tenue des présentations orales et des workshops (150 participants).

[OC2] Membre du comité d'organisation de l'école d'été EMR'06 « *Modelling and control of electrical systems* » (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), 13 et 14 novembre 2006, Lille, France. Responsable de la logistique attenante aux personnes invitées (50 participants dont 10 invités).

[OC1] Membre du comité d'organisation de l'école d'été FGMCSE (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), juillet 2005, Lille, France. Aide à la logistique permettant la tenue des présentations orale (50 participants).

Je suis d'ores et déjà compté dans les membres organisateurs du congrès EPE 2013 (<http://www.epe2013.com/>) qui accueille plus de 1000 participants tous les deux ans.

Encadrement doctoral et scientifique

J'ai co-encadré 8 masters de recherche [MR1]-[MR8] (6 du master E2D2 : Energie Electrique et Développement Durable, 1 du master KIMP : Knowledge Integration in Mechanical Production et 1 du MVE : Mobilité et Véhicules Electriques) en essayant toujours de m'associer à des collègues de laboratoires (LML, LAPLACE, LAGIS) et de disciplines (Science des Matériaux, Automatique) différents. Cette démarche me permet de posséder une ouverture d'esprit ainsi que de fonder des relations solides en vue de probables co-encadrements de thèses pluridisciplinaires.

J'ai enfin co-encadré ou co-encadre 5 thèses de doctorat [TH1]-[TH5] (trois thèses soutenues, deux soutenances prévues avant début 2013) avec un taux d'encadrement toujours au moins de 50%. J'ai donc non seulement développé et publié des travaux de recherche avec mes doctorants mais j'ai également appris (même si cela peut être considéré comme trop tôt) à diriger les recherches d'un doctorant.

Réseaux de recherche

J'ai été, dès le début de ma thèse en 2001, sensibilisé au partage des savoirs et à la nécessité des discussions et échanges scientifiques en participant à l'action « Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs » (SMM) du GdR SDSE [DIV1]. Cette action s'est poursuivie durant le GdR ME2MS auquel j'ai continué de participer [DIV2], [DIV3]. Depuis 2008 je participe à l'inter-GDR SEEDS-MACS, « *Projet Observateur pour le Diagnostic et la Commande des Systèmes Electriques* ». J'ai d'ailleurs eu l'occasion d'aider à la logistique nécessaire à la tenue des réunions.

Enfin, en 2010, j'ai été co-responsable du projet interne ACCORD (Analyse et Caractérisation de CORrecteurs Résonnants Digitaux) du groupement de recherche SEEDS. Doté d'un financement de 12k€, nous avons, avec un collègue du laboratoire LAPLACE, chacun encadré un stage de Master [MR5] et avons synthétisé dans [CI24] une partie des résultats des travaux alors accomplis.

Valorisation de collections

Par deux fois, je fus sollicité pour co-rédiger des chapitres dans les traités EGEM qui permettent une capitalisation et diffusion des connaissances en génie électrique de la communauté universitaire française et francophone [OS1], [OS4]. J'ai supervisé la traduction en anglais des chapitres de ces ouvrages qui sont publiés aux éditions Wiley [OS3], [OS5].

Valorisation de la recherche

[VR5] Co-direction scientifique et responsabilité administrative du projet SOFRACI « *Structure Onduleur Fort Rendement A fonction Charge Intégrée* », Fonds FUI, Chef de File VALEO, 2010-2013, 430k€ dont 250k€ pour salaires (**[TH5]** et un ingénieur de recherche) et 180k€ pour l'équipement, les frais de mission et le consommable.

[VR4] Co-direction scientifique du projet MHYGALE « *Mild HYbrid GénérALisable* », Financement ADEME, VALEO, 2009-2012, 820k€ dont 520k€ pour salaires (**[TH4]** et autre doctorant et ingénieur de recherche) et 300k€ pour l'équipement, les frais de mission et le consommable.

[VR3] Co-direction scientifique et responsabilité administrative de l'étude « *Commande et synchronisation des systèmes de guidage multi-actionnés* », société ETEL, 2008-2010, 60k€. Contrat d'accompagnement de la thèse **[TH3]**.

[VR2] Co-direction scientifique et responsabilité administrative de l'étude « *Modélisation et amélioration d'une commande sinus pour moteur synchrone à flux orienté et son exploitation sur nouvelle cible* », société PELLENC SA, 2008, 12k€. Contrat d'accompagnement du Master **[MR4]**.

[VR1] Co-direction scientifique de l'étude « *Interfaçage de mesure et de puissance pour commande de machine polyphasée* », société DSPACE, 2005, 15,1k€.

Rayonnement : échanges internationaux (participation à un réseau de recherche, invitations dans des universités étrangères...), expertise (organismes nationaux ou internationaux), responsabilités éditoriales, participation jury de thèse et de HDR, diffusion du savoir, responsabilités et activités au sein des sociétés savantes

[INV1] Professeur invité pendant une semaine à l'Université de Linköping (Suède) département IEI (Department of Management and Engineering - <http://www.iei.liu.se/?l=en&sc=true>), décembre 2008. Mise en place du Master bi-diplômant KIMP-APS et d'une thématique de recherche commune autour des systèmes de production avancés.

[EXP1] Evaluation d'une demande de subvention à la découverte pour le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), No de la demande: 138496, décembre 2011.

Reviewing:

[RW7] 2 reviewings pour "*IEEE Transactions on Industry Applications*", août 2007 et janvier 2012.

[RW6] 1 reviewing pour "*International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation*", octobre 2011.

[RW5] 1 reviewing pour "*IEEE Transactions on Vehicular Technology*", janvier 2011.

[RW4] 4 reviewings pour "*Vehicule Power and Propulsion Conference*", septembre 2010.

[RW3] 4 reviewings pour "*European Power Electronics and application*", mai 2010.

[RW2] 3 reviewings pour "*IEEE Transactions of Industrial Electronics*" :

- 2 soumissions à special sections on "*Sliding Mode Control in Industrial Applications*", février 2008
- 1 soumission à special sections on "*Multi-phase machines*", avril 2007

[RW1] 1 reviewing pour "*European Power Electronics Journal*", août 2006.

Diffusion du savoir:

Je participe aux écoles d'été qu'organise l'équipe « Commande » du L2EP afin d'assurer la transmission des savoirs spécifiques développés dans notre équipe [DIV4], [DIV5] [DIV6].

Activités pédagogiques

Présentation de l'activité d'enseignement

Durant mes années de professeur agrégé en lycée de 1997 à 2002, j'ai découvert le monde de l'enseignement supérieur en tant que vacataire (50 heures de TP de génie électrique en première

année à l'école Centrale de Lille (ECL) et deuxième année à l'Institut de Génie Informatique et Industriel de Lens (IG2I)).

Enthousiasmé par ces expériences, j'ai pu être recruté, en 2002, sur un poste de professeur agrégé en génie électrique à l'IUT A de Villeneuve d'Ascq dans le département de Génie Electrique et d'Informatique Industrielle (GEII). Enseignant les TP d'Automatisme et responsable des TP d'Electrotechnique et du module d'Études et Réalisations, j'ai développé la démarche d'enseignement par projets. Ce mode d'enseignement permet de mettre en œuvre un projet technique industriel et donne l'occasion de mettre en pratique les savoirs et surtout les savoir-faire du GEII, afin de répondre à un cahier des charges donné. De façon à motiver les élèves, j'ai choisi comme support un robot mobile autonome. J'ai accru la stimulation des élèves en faisant participer les deux meilleurs groupes de projet à la Coupe de France robotique IUT GEII à Vierzon durant les deux années où j'ai exercé à l'IUT.

Mon arrivée à Arts et Métiers ParisTech en tant que maître de conférences correspond à la mise en place du nouveau programme de formation intitulé FITE (Formation d'Ingénieur en TEchnologie). J'ai décidé de consacrer beaucoup de temps à collaborer à la mise en place des nouveaux cours, TD et TP en génie électrique de première et de deuxième année. J'ai enfin, entre 2004 et 2007, développé et enseigné un cours de machines électriques et les exercices associés (8h de cours et 12h de travaux dirigés) pour les étudiants de deuxième année du nouvel Institut Technologique Européen d'Entrepreneuriat et de Management (ITEEM).

Arts et Métiers ParisTech étant un établissement où existent de fortes activités à l'international, je me suis impliqué dans les échanges avec l'étranger dès mon arrivée à l'école. J'ai accepté en septembre 2006 de devenir le correspondant relations internationales « pays nordiques et baltes » qui est impliqué dans toutes les actions avec les pays de cette zone. A ce titre, je valide entre autres les contrats d'études des élèves y effectuant un séjour académique (50 élèves). En septembre 2010, suite à la création d'une Direction Générale des Relations Internationales (DGRI), j'ai pris la responsabilité du Bureau des Relations Internationales (BRI) du centre de Lille. J'étais à ce titre le correspondant du centre de Lille vis-à-vis de la DGRI (décharge d'enseignement de 96h équivalent TD par an). J'ai cessé d'occuper cette fonction fin Août 2012.

Parallèlement au développement d'une thématique de recherche centrée sur la modélisation et la commande des systèmes de production à dynamique élevée multi-actionnés, de 2006 à 2008, j'ai enseigné une partie du module « EC1 : Impact des nouvelles technologies sur les machines de production à dynamique élevée » (12h sur un total de 28h) du cours « Innovation en Mécatronique » du master Energie Electrique et Développement Durable (E2D2) (<http://master-ase.univ-lille1.fr/index.php?page=M2-E2SD-E2D2>), cohabilité par l'Université des Sciences et Technologies de

Lille (USTL), l'École Centrale de Lille et Arts et Métiers ParisTech, et dans lequel les enseignants-chercheurs du L2EP sont impliqués.

J'ai dans le même temps en septembre 2006 mis en place la formation terminale (3ème année) « Agile Systems Engineering » autour des systèmes agiles de production (220 h de cours et 4 mois de projet d'expertise - 14 étudiants en moyenne). Mes fonctions consistaient à élaborer le programme de formation, à gérer l'emploi du temps, les intervenants et les jurys. J'ai enfin été responsable du module « Innovation en Mécatronique » de 40h dans lequel j'enseignais 20h. J'ai parallèlement supervisé le montage d'une plate-forme technologique dédiée à ces systèmes, ce qui m'a amené à multiplier les échanges et à initier des activités contractuelles. Ces échanges m'ont également conduit, en mars 2009, à aider au montage et à enseigner 12h de cours dans la formation de six jours intitulée « Modeling and Control of Industrial Positioning Systems » à des personnels de la société EADS dans le cadre de leur formation continue.

En octobre 2007, je suis devenu responsable du module « Systèmes de mesures appliqués au contexte énergétique » du Mastère Spécialisé « Technologies des Systèmes Hybrides de Production d'Electricité et de Chaleur (SYSPEC) » qui démarra à la même date (http://www.ensam.fr/fr/formation_initiale/masteres_specialises/technologies_des_systemes_hybrides_de_production_d_electricite_et_de_chaleur_specialite_gestion_des_nouvelles_energies) (20 étudiants en moyenne). J'ai participé au recrutement des candidats, mis en place l'organisation pédagogique du module et des évaluations associées. J'enseignais enfin 12h dans le module qui en comptait un total de 40. J'ai cessé ces activités à la fin de l'année scolaire 2009-2010.

En septembre 2010, un partenariat entre ParisTech et la fondation Renault a donné naissance au Master / Mastère Spécialisé « Maitrise de l'Energie des Véhicules Electriques : du Réseau de distribution à la Roue » (MEVE-2R) dont une partie est enseignée au centre de Lille (http://www.ensam.fr/fr/formation_initiale/masteres_specialises/ingenierie_des_vehicules_electriques) (20 étudiants en moyenne). J'ai été sollicité pour mettre en place et devenir responsable du module « Les conversions Electrique/Electrique ». Mon rôle consiste en l'organisation pédagogique du module et des évaluations associées. J'enseigne 24h dans ce module qui en compte 54 au total.

Continuant à développer mes activités de recherche autour des systèmes polyphasés, de 2005 à 2010, j'ai développé et enseigné aux élèves officiers de l'école Navale (Ecole partenaire d'Arts et Métiers ParisTech) un cours de 8h sur la « Propulsion Electrique ».

Fort désormais d'une bonne expérience dans l'international et soutenu par la direction générale des études, j'ai, en septembre 2010, transformé l'année terminale ASE en un parcours « Advanced Production Systems » du Master Knowledge Integration in Mechanical Production (KIMP) déjà en place depuis quelques années au CER de Paris (Parcours Design and Manufacturing) (http://www.ensam.fr/fr/formation_initiale/masters_recherche/conception_industrialisation_risque

[decision/specialty knowledge integration in mechanical production](#)). Tous les enseignements du Master sont en anglais et permettent l'accueil et la diplomation d'étudiants non-francophones en un an. Cette transformation s'est accompagnée de signatures de doubles diplômes niveau Master avec les universités Suédoises KTH de Stockholm et LiU de Linköping que j'ai accompagnées en tant que correspondant pays nordiques et baltes. Suite à ces actions, j'ai pleinement participé à la mise en place de deux accords de double diplôme niveau ingénieur avec KTH.

Enfin, j'ai accepté en septembre 2011, suite au départ à la retraite du professeur Patrick Martin, créateur et responsable de la formation, la responsabilité du Master international bi-diplômant KIMP. Doté de deux parcours : Advanced Production Systems (APS) au centre Arts et Métiers ParisTech de Lille et Design and Manufacturing (DM) au centre Arts et Métiers ParisTech de Paris, le master recrute chaque année autour de 50 élèves dont, pour l'année 2011-2012, 30% d'étrangers de 13 nationalités différentes. Le master KIMP a été labélisé par le PRES ParisTech et possède maintenant la mention « flag Master ParisTech » (http://master.paristech.fr/index.php/mas_fre/Masters/Innovation-conception-industrialisation/Knowledge-Integration-in-Mechanical-Production).

Présentation synthétique des enseignements par niveau (L.M.D), par type de formation (formation initiale/continue, professionnelle, présentielle /à distance) et par nature (Cours, TD, TP, encadrement de travaux de fin d'étude et de stages) :

Enseignements niveau L

[ENL5] depuis 2010 : en moyenne 30h/an de CM, 40h/an de TD de génie électrique . 1^{ère} année. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENL4] 2004-2009 : en moyenne 30h/an de CM, 50h/an de TD et 60h/an de TP de génie électrique . 1^{ère} année. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENL3] 2004-2007 : 8h/an de CM et 12h/an de TD. 2^{ème} année. Institut Technologique Européen d'Entrepreneuriat et de Management (ITEEM). Vacataire.

[ENL2] 2002-2004 : 384h/an équivalent TD de TP d'électrotechnique, TP d'automatisme et module d'Études et Réalisations. 1^{ère} et 2^{ème} année du département GEII de l'IUT A de l'USTL. Professeur agrégé.

[ENL1] 1997-2002 : 50 h/an de TP de génie électrique. 1^{ère} année de l'école Centrale de Lille (ECL) et 2^{ème} année de l'Institut de Génie Informatique et Industriel de Lens (IG2I). Vacataire.

Enseignements niveau M

[ENM8] depuis 2004 : Encadrement de 7 projets de Master. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENM7] depuis 2004 : Encadrement de 15 projets de fin d'études. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENM6] depuis 2010 : 6h/an de CM sur la modélisation et la commande des systèmes électromécaniques et 6h/an de CM de « Research Methodology ». Master KIMP parcours APS. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENM5] 2006-2010 : 20h/an de CM sur la modélisation et la commande des systèmes électromécaniques. Année Terminale ASE. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENM4] 2005-2010 : 8h/an de CM sur la propulsion électrique. 2^{ème} année. Ecole Navale. Vacataire.

[ENM3] 2006-2008 : 12h/an de CM sur la modélisation et la commande des machines de production à dynamique élevée. Master E2D2. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[ENM2] 2004-2005 : 8h/an. Encadrement du Projet de Bureau d'Étude. Master Professionnel GR2E. Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL). Vacataire.

[ENM1] 2004-2005 : en moyenne 30h/an de TD de génie électrique. 2^{ème} année. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

Formation continue

[EFC5] depuis 2010 : encadrement de deux stages industriels. Mastère MEVE-2R. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[EFC4] depuis 2010 : 24h/an de cours. Mastère MEVE-2R. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[EFC3] 2009 : 12h de cours dans la formation de six jours intitulée « Modeling and Control of Industrial Positioning Systems ». Personnel de la société EADS. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[EFC2] 2007-2010 : 12h/an de cours. Mastère SYSPEC. Arts et Métiers ParisTech. Maître de Conférences.

[EFC1] 2004-2005 : 12h de cours. Module Capteurs et Instrumentation. Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). Arts et Métiers ParisTech. Vacataire.

Direction et animation de formations, dont partenariats internationaux

[DAF5] depuis 2011 : Responsable du Master international bi-diplômant « Knowledge Intergration in Mechanical Production » qui possède deux parcours « Advanced Production Systems » et « Design and Manufacturing » et trois accords de double diplômes (avec KTH Stockholm, LiU Linköping et l'Université de Téhéran). Arts et Métiers ParisTech. 50 élèves dont 30% d'étrangers de 13 nationalités, 150h de cours et 4 mois de thèse de master.

[DAF4] 2010 : Responsable du parcours « Advanced Production Systems » du Master « Knowledge Intergration in Mechanical Production. Arts et Métiers ParisTech. 24 h de cours.

[DAF3] 2006-2010 : Responsable de l'année terminale « Agile Systems Engineering » (ASE). Arts et Métiers ParisTech. 220h de cours et 4 mois de projet d'expertise - 14 étudiants en moyenne.

[DAF2] depuis 2010 : Responsable du module « Les conversions Electrique/Electrique » du Master/Mastère Spécialisé « Maitrise de l'Energie des Véhicules Electriques : du Réseau de distribution à la Roue » (MEVE-2R). Arts et Métiers ParisTech. 54h de cours.

[DAF1] 2006-2009 : Responsable du module « Systèmes de mesures appliqués au contexte énergétique » du Mastère Spécialisé « Technologies des Systèmes Hybrides de Production d'Electricité et de Chaleur » (SYSPEC). Arts et Métiers ParisTech. 40h de cours.

Rayonnement et activités internationales

[RAI2] 2010-2012 : Responsable du Bureau des Relations Internationales (BRI) du centre d'enseignement et de recherche Arts et Métiers ParisTech de Lille. 300 élèves. 40 enseignants, enseignants-chercheurs.

[RAI1] depuis 2006 : Correspondant relations internationales « pays nordiques et baltes ». 50 élèves en échange par an.

Responsabilités Collectives

Présentation générale des responsabilités particulières

Dès ma nomination en 1994 en tant que professeur certifié, chaque fin d'année scolaire j'ai été examinateur lors des épreuves pratiques du baccalauréat Sciences et Techniques Industrielles en génie électrotechnique. Nommé professeur agrégé, j'ai été président du jury de baccalauréat Scientifique en Sciences de l'Ingénieur S-SI de 1998 à 2002 (une cinquantaine de candidats sous ma responsabilité).

A mon arrivée au Centre d'Enseignement et de Recherche (CER) Arts et Métiers ParisTech de Lille en 2004, j'ai voulu être au cœur des préoccupations du centre et de 2005 à 2010 et j'ai été élu membre titulaire du Conseil d'Administration du CER Arts et Métiers ParisTech de Lille (un conseil en moyenne tous les deux mois, 20 personnes réunies). Pour les mêmes raisons vis-à-vis de mon laboratoire, j'ai été élu membre titulaire du conseil de laboratoire du L2EP de 2006 à 2010 (Un conseil tous les deux mois, 15 personnes réunies).

Juste avant le passage aux compétences élargies de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), j'ai accepté d'être membre extérieur titulaire de la commission de spécialiste 63ème section de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1 de 2007 à 2008 (examen de 3 dossiers de McF).

Désirant participer au recrutement des élèves qui souhaitent intégrer Arts et Métiers ParisTech, j'ai fait partie, de 2008 à 2011, de l'équipe élaborant les sujets de concours et corrigeant les copies de l'épreuve de Sciences Industrielles du concours commun E3A PSI (groupe de 10 personnes). J'ai à ce titre élaboré le sujet de la session 2011 (une dizaine de réunions par an, 400 copies à corriger par an et plus de 50h de travail pour élaborer le sujet).

Ayant une vue plus précise de l'école et une certaine expérience, je participe plus activement à son fonctionnement en étant élu depuis 2010 membre suppléant du Conseil d'Administration d'Arts et Métiers ParisTech (8 centres et trois instituts). Je suis à ce titre membre de droit du Conseil d'Administration Restreint aux Enseignants-Chercheurs (plusieurs réunions par an).

Enfin, depuis 2010 je fais partie du Conseil Régional de Vie à l'Ecole (CRVE composé d'une quinzaine de personnes allant de personnalités extérieures aux élèves); cette action permet d'apprendre à mieux se connaître et à partager, d'améliorer la vie à l'école et de faire émerger une dynamique et des projets partagés. L'objectif final est de remettre au cœur de nos actions la formation des étudiants et la participation active de l'ensemble des acteurs dans l'école (une réunion tous les deux mois, 10 personnes réunies).

Responsabilités administratives :

[RC3] depuis 2010: Membre suppléant élu du Conseil d'Administration d'Arts et Métiers ParisTech (8 centres et trois instituts). Membre de droit du Conseil d'Administration Restreint aux enseignants-chercheurs

[RC2] 2006-2010 : Membre titulaire élu du conseil de laboratoire du L2EP.

[RC1] 2005-2010 : Membre titulaire élu du Conseil d'Administration du centre Arts et Métiers ParisTech de Lille.

Responsabilités dans les projets et la vie collective de l'établissement

[RC4] depuis 2010 : Membre du Conseil Régional de Vie à l'Ecole (CRVE).

Responsabilités et mandats nationaux ou régionaux

[RC7] 2008-2011 : Membre de l'équipe élaborant les sujets de concours et corrigeant les copies de l'épreuve de Sciences Industrielles du concours commun E3A PSI. Elaboration du sujet de la session 2011.

[RC6] 2007-2008 : Membre extérieur titulaire de la commission de spécialistes 63^{ème} section de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1.

[RC5] 1994-2002 : Examineur au baccalauréat STI génie Electrotechnique puis président de jury du baccalauréat S-SI.

Liste classée des publications

Voir la Bibliographie à la fin du document

Encadrement doctoral et scientifique

Encadrements de masters

[MR8] « *Comparaison des chargeurs de batteries pour véhicules électriques* », Mazen LTEIF, Master Recherche Mobilité et Véhicules Electriques (MVE), année universitaire 2010-2011, Xavier KESTELYN (100%) – L2EP. Soutenue en juin 2011.

[MR7] « *Metallographic characterization, design analysis and machining mode definition of the inserting tools for increase the lifetime and outsource the supply towards new supplier(s)* », Alexandre PILLE, Master Recherche KIMP (Knowledge Integration in Mechanical Production), année universitaire 2010-2011, Alain IOST (50%)-LML - Xavier KESTELYN (50%)-L2EP, VALEO Electrical Systems Stator P2. Soutenue en juin 2011.

[MR6] « *Commande d'un onduleur 6 bras pour VE en mode recharge* », Guillaume CAMPO, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2010-2011, Xavier KESTELYN (50%)-L2EP, Walter LHOMME (50%)-L2EP. Soutenue en juin 2011.

Publication associée : [CI34]

[MR5] « *Analyse et Caractérisation des CORrecteurs Résonants Digitaux —Projet ACCORD de SEEDS* », Ngoc-Anh ANH NGUYEN, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2010-2011, Xavier KESTELYN (80%)-L2EP, Pascal MAUSSION (20%)-LAPLACE. Soutenue en juin 2011.

Publication associée : [CI33]

[MR4] « *Energetic optimization and drive control of a hand-held cutting device* », Nathalie SAKER, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2008-2009, Jean-Yves DIEULOT (50%)-LAGIS, Xavier KESTELYN (50%)-L2EP.

[MR3] « *Etude du couplage mécanique entre deux moteurs linéaires équipant un robot cartésien monté en Gantry* », Raphaël CARPENTIER, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2006-2007, Pierre-Jean BARRE (40%)-L2EP, Xavier KESTELYN (60%)-L2EP.

Publication associée : [CI18]

[MR2] « *Structure de commande de deux moteurs montés en Gantry* », Thomas MAILER, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2005-2006, Pierre-Jean BARRE (40%)-L2EP, Xavier KESTELYN (60%)-L2EP.

[MR1] « *Caractérisation et commande d'un entraînement pentaphasé en mode dégradé* », Yvan CREVITS, Master Recherche E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable), année universitaire 2004-2005, L2EP, Xavier KESTELYN (50%)-L2EP -Eric SEMAIL (50%) -L2EP.

Publication associée : [CI9]

Co-encadrements de thèses

[TH5] « *Modélisation et commande de machines à trois phases indépendantes pour intégration dans un système de traction/chargeur de batterie* », Paul SANDULESCU, Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, démarrée en janvier 2010, soutenance prévue en février 2013, financement FUI SOFRACI avec la société VALEO.

Directeur de thèse : Eric SEMAIL (50%), Co-encadrement de la thèse : Xavier KESTELYN (50%).

Publications associées : [CI34] [CI32] [CI30] [CI28].

Une soumission à « IET Electrical Systems in Transportation » et une soumission à « IEEE Transactions on Vehicular Technology » en révision.

[TH4] « *Commande de Machines Polyphasées à Aimants Permanentes Réductantes pour la Réalisation d'une Fonctionnalité MILD Hybride* », Li LU, Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, démarrée en octobre 2009, soutenance prévue en juin 2013, financée CIFRE avec la société VALEO dans le cadre de l'appel à projet ADEME « Véhicules routiers à faibles émissions de gaz à effet de serre », filière 3 « système de transport innovant économe en énergie et/ou à faibles rejets de gaz à effet de serre ».

Directeur de thèse : Eric SEMAIL (50%), Co-encadrement de la thèse : Xavier KESTELYN (50%).

Publications associées : [CI32] [CI31] [CN1].

[TH3] « *Modélisation et commande d'un système multi-actionnés parallèle de grande dimension* », Ivan GARCIA-HERREROS, Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, démarrée en décembre 2008 et soutenue le 23 mai 2012, financée CIFRE avec la société ETEL.

Directeur de thèse : Pierre-Jean BARRE (25%), Co-encadrement de la thèse : Xavier KESTELYN (75%).

Publications associées : [CI25] [CI23] [DIV5].

Une soumission à « Control Engineering Practice » en révision.

Ivan Garcia-Herreros est ingénieur de recherche dans la société ETEL.

[TH2] « *Commande auto-adaptative de machines synchrones polyphasées en mode dégradé* », Yvan CREVITS (Professeur agrégé en fonction), Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de Lille1, démarrée en septembre 2005 et soutenue le 12 juillet 2010, non financée.

Directeur de thèse : Betty SEMAIL (25%), Co-encadrement de la thèse : Xavier KESTELYN (75%).

Publications associées : [RI9] [CI26] [CI24] [CI22] [CI20] [CI15].

Yvan Crévits est Professeur Agrégé au Lycée du Hainaut à Valenciennes

[TH1] « *Analyse de systèmes multi-actionnés parallèles par une approche graphique causale. Application à un processus électromagnétique de positionnement rapide* », Julien GOMAND, Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, démarrée en septembre 2005 et soutenue le 04 décembre 2008, financée par le Ministère et en collaboration avec la société ETEL.

Directeur de thèse : Jean-Paul HAUTIER (10%), Co-encadrement de la thèse : Pierre-Jean BARRE (40%) et Xavier KESTELYN (50%). Obtention du prix de thèse Béziers 2009.

Publications associées : [BR1] [RI7] [RI5] [CI19] [CI18] [CI17] [CN4].

Julien GOMAND est Maître de conférences à Arts et Métiers ParisTech à CER d'Aix en Provence

Deuxième partie

Contexte et Positionnement des Travaux de Recherche

Après avoir donné une définition et les avantages inhérents aux systèmes électromécaniques à entrées multiples, on montre, par le biais de deux groupes applicatifs distincts, quels outils et méthodes ont été développés pour la résolution des verrous posés par ces systèmes complexes. Les travaux spécifiques développés par le L2EP seront particulièrement exposés dans la partie 3 de ce mémoire.

On conclût cette partie en constatant, de notre point de vue, que les problèmes sont abordés au cas par cas sans volonté forte de développement d'outils méthodologiques qui permettraient la résolution des problèmes de façon plus systématique et unifiée.

La modélisation physique vectorielle et la Représentation Energétique Macroscopique, développées en particulier par l'équipe « Commande » du L2EP, sont introduites et présentées comme candidates intéressantes à l'étude des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées.

1. Les systèmes électromécaniques à entrées multiples

1.1 Présentation et intérêt

1.1.1 Terminologie choisie

Le terme choisi de systèmes à entrées multiples correspond à des systèmes dynamiques multi-variables, plus connus sous le vocable MIMO (Multi Input Multi Output). Ces systèmes ne se réduisent pas à la mise en parallèle de systèmes monoentrée-monosortie car l'application d'un signal sur une entrée entraîne en une variation de plusieurs ou de toutes les sorties. De ce fait, un système MIMO n'est pas « comme » un système monovariable avec des calculs plus compliqués, mais quelque chose de totalement différent [Fossard97].

Nous avons dans ce mémoire volontairement évité le terme MIMO pour insister sur la particularité des systèmes retenus, particularité qui est l'enjeu de nos études. Ces systèmes, s'ils possèdent bien plusieurs entrées et sont caractérisés par des phénomènes de couplage ou d'interaction internes forts, sont particuliers dans la mesure où étant de nature électromécanique, la gestion de des énergies qui y circulent ou y sont stockées est une action prioritaire.

Le terme MIMO, associé à des techniques de représentation et de commande bien identifiées et issues de l'automatique, nous semble alors trop général par rapport aux méthodes spécifiques de modélisation et de commande des systèmes électromécaniques à multiples entrées présentées dans ce mémoire.

Même si les techniques développées dans ce mémoire sont applicables à d'autres domaines de la physique (quitte à les adapter s'il le fallait), nous nous sommes limités à l'étude des systèmes convertisseurs d'énergies présentant des couplages de nature électrique, magnétique et mécanique. Nous les dénommons dans ce mémoire «systèmes électromécaniques».

1.1.2 Qualités attendues des systèmes électromécaniques

Si on se limite aux propriétés techniques des systèmes électromécaniques qui composent les produits et systèmes de production modernes, les qualités attendues peuvent être :

Un rendement énergétique le plus élevé possible

La réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que la raréfaction des énergies primaires amènent tout naturellement à penser des systèmes moins gourmands en énergie. Notons aussi que la réduction de pertes signifie donc moins de chaleur à évacuer, ce qui facilite grandement la conception et l'intégration du système électromécanique dans le produit final.

Une puissance volumique importante

L'utilisation d'une technologie innovante se heurte souvent à un problème d'intégration, particulièrement dans un monde où les dispositifs mobiles font légion. La recherche de dispositifs à forte densité de puissance devient alors un levier supplémentaire lors de la phase de conception d'un produit.

Des performances dynamiques accrues

S'il est relativement aisé d'optimiser un système pour un point de fonctionnement donné, il est plus difficile d'obtenir des performances tout aussi comparables lors des phases transitoires.

Une fiabilité importante accompagnée souvent d'une possibilité de fonctionnement en mode dégradé satisfaisant

Le temps moyen entre pannes, expression souvent désignée par son sigle anglais MTBF (Mean Time Between Failures), est une des valeurs qui indiquent la fiabilité d'un composant d'un produit ou d'un système. On sait combien l'argument de la fiabilité est important lorsque l'on veut adopter une nouvelle technologie. Si une panne ne peut être évitée, un fonctionnement en mode dégradé peut-être très apprécié dans certaines conditions.

Une architecture modulable et composée de sous-ensembles standards

Lors de la phase de conception d'un système, c'est un levier très important qui permet de conserver des briques technologiques conçues en grande série plutôt qu'au cas par cas.

La multiplication de sous-systèmes identiques décentralisés mais couplés, de puissance réduite, en lieu et place d'un système central de forte puissance, permet de répondre aux exigences précitées.

Le paragraphe suivant présente les deux groupes de systèmes applicatifs retenus dans les travaux menés jusqu'alors. Nous n'avons volontairement mentionné que des travaux réalisés par

d'autres contributeurs que les membres de l'équipe « Commande » du L2EP. L'exposé des travaux et méthodes que nous avons développés est réalisé dans la partie 3 de ce mémoire, consacrée à nos contributions. Le choix que nous avons fait des systèmes polyphasés et gantry bi-actionnés illustre, à notre sens, des exemples modernes probants d'utilisation de systèmes électromécaniques à entrées multiples.

1.2 Les deux groupes de systèmes applicatifs retenus

Les ensembles convertisseurs-machines polyphasés, premier groupe applicatif présenté, ont été l'objet des études menées dès 2000 lors de ma thèse, dirigée par le professeur Jean-Paul Hautier et co-encadrée par Eric Semail à l'époque maître de conférences à Arts et Métiers ParisTech CER de Lille, maintenant professeur des universités, avec qui je continue à travailler sur la même thématique.

C'est à mon arrivée en 2004 en tant que maître de conférences à Arts et Métiers ParisTech au CER de Lille que j'ai abordé l'étude des robots de type gantry. Cette thématique était dirigée par le professeur Pierre-Jean Barre alors maître de conférence à Arts et Métiers ParisTech CER de Lille et responsable de l'ERT CEMODYNE (Equipe de Recherche Technologique « Commande et Entraînement des Machines-Outils à DYNamique Elevée »). Par le biais de thèses CIFRE ou de financement dans le cadre de projets nationaux (FUI, ADEME), les sociétés VALEO (concernant les ensembles polyphasés) et ETEL (concernant les robots de type gantry) ont suscité des échanges fructueux qui ont toujours permis de placer nos travaux dans un contexte sociétal.

Il ne s'agit pas dans les paragraphes suivants de faire une revue complète des systèmes polyphasés comme des robots de type gantry mais, pour chaque groupe applicatif, de montrer les différents outils qui ont été développés pour répondre aux verrous posés par ces systèmes complexes. L'objectif est que le lecteur puisse prendre conscience des difficultés induites par la modélisation et la commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples, par le biais de systèmes réels, et du manque d'outils méthodologiques qui permettraient de résoudre ces problèmes de façon plus systématique et unifiée.

1.2.1 Ensembles convertisseur-machine polyphasés¹

La nature des machines polyphasées est la même que celles des machines triphasées, à savoir synchrone ou asynchrone. Il est par contre difficile a priori de donner une définition exacte (en tout cas académique) d'un ensemble convertisseur-machine polyphasé. En effet, deux approches

¹ Voir les «surveys» [Singh02], [Jones02], [Bojoi06], [Levi07] et [Semail09] pour une littérature exhaustive sur le sujet.

coexistent, basées soit sur le nombre de phases de la machine étudiée [Klingshirn83-1], [Klingshirn83-2], [Levi08-1], soit sur le nombre de fils connectant la machine à son alimentation.

La première définition consiste à considérer le nombre de phases de la machine comme l'élément déterminant. La machine triphasée étant le standard depuis plus d'un siècle maintenant, une machine est considérée polyphasée si son nombre de phases est supérieur à trois. Un ensemble polyphasé est donc, suivant cette définition, composé d'un convertisseur alimentant une machine électrique possédant plus de trois phases. Cette première définition ne permet pas de qualifier un ensemble constitué d'une machine triphasée dont chaque phase est alimentée par un pont en H comme étant polyphasé [Janhs80]. En effet, nous excluons toute approche de type « boîte noire », ce qui oblige à une connaissance interne suffisante de la machine. Pourtant, l'absence de couplage électrique (étoile ou triangle) entre phases de la machine permet de passer de deux courants indépendants (cas classique) à trois (la grandeur homopolaire étant maintenant libre d'évoluer et pouvant le cas échéant être contrôlée). Ceci distingue d'ailleurs en partie le mode de commande d'un ensemble polyphasé de celui d'un système triphasé couplé en étoile ou triangle et impose de disposer d'outils d'analyse propres. Pour cette raison, une deuxième définition d'un ensemble polyphasé est basée sur le nombre de fils alimentant la machine.

La méthodologie présentée dans ce mémoire repose sur une modélisation physique des systèmes. La première définition sera alors préférée, à laquelle on précisera le mode de couplage entre les phases ou bien le nombre de fils d'alimentation. On notera tout de même les cas particuliers des machines possédant un nombre important de phases déjà couplées en interne. Par exemple, une machine hexaphasée double étoile, largement utilisée dans des applications de puissance telles que la traction ferroviaire [Hamel81], peut être considérée comme une machine à douze phases dont les phases décalées de 180° ont été connectées en anti-série et dont deux groupes de phases décalées de 120° sont couplées en étoile.

Le Tableau 1 propose un tableau récapitulatif des différentes configurations de machines polyphasées que l'on peut rencontrer.

TABLE 1a. HPO Machines Having Multiple of Three Phases ($\gamma=3$)

PHASE BELT ANGLE DEGREES (β)	120	60	60	40	30	30	20	20
NUMBER OF PHASE BELT PER POLE (ϕ)	1.5	3	3	4.5	6	6	9	9
NUMBER OF STATOR TERMINALS (MINIMUM)	3	3	6	9	6	12	9	18
CONNECTION NAME	THREE PHASE	SEMI SIX PHASE	SIX PHASE	NINE PHASE	SEMI 12-PHASE	12-PHASE	SEMI 18 PHASE	18-PHASE
SCHEMATIC DIAGRAM OF STAR CONNECTION & VOLTAGE PHASOR DIAGRAM (MESH CONNECTION MAY BE USED ALSO)								
ALTERNATE DIAGRAM OR COMMON NAME		THREE PHASE						

TABLE 1b. HPO Machines Having Other Than Multiple Three Phases ($\gamma \neq 3$)

PHASE BELT ANGLE DEGREES (β)	90°	90°	45°	45°	36°	25.71°	18°	18°
NUMBER OF PHASE BELT PER POLE (ϕ)	2	2	4	4	5	7	10	10
NUMBER OF STATOR TERMINALS (MINIMUM)	3	4	5	8	5	7	5	10
CONNECTION NAME	SEMI 4 OR 2 PHASE	4-PHASE	SEMI-5 PHASE	8-PHASES	5-PHASE	7-PHASE	SEMI-10 PHASE	10 PHASE
SCHEMATIC DIAGRAM OF CONNECTIONS AND VOLTAGE PHASOR DIAGRAM								

Tableau 1: Récapitulatif des différentes configurations de machines polyphasées [Klingshirn85]

Au final, d'un point de vue de la commande, il est essentiel de considérer le nombre de courants (de variables d'état énergétiques) indépendamment contrôlables de l'ensemble. En ce sens, un ensemble sera considéré comme polyphasé si le nombre de courants contrôlables de la machine est supérieur à deux.

En résumé, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation des systèmes polyphasés permettant de ne retenir que des variables énergétiques indépendantes (tels que décrits par les systèmes d'état minimal).

Multiplier le nombre de courants indépendamment contrôlables (ou le nombre de phases) propose plusieurs avantages [Parsa05-3]:

- De réduire en amplitude et d'augmenter la fréquence des ondulations de couple ;
- De permettre un fonctionnement en mode dégradé, particulièrement d'alimentation (Perte de contrôlabilité d'un ou de plusieurs courants) ;
- De fractionner la puissance en plus de trois voies et ainsi de réduire les amplitudes des courants/tensions dans chaque bras, ceci augmentant a priori la fiabilité tout en

permettant d'accroître la qualité des signaux (par augmentation de la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance) ;

- D'augmenter la puissance par unité de volume ;
- D'offrir plus de liberté lors la conception de la machine ainsi que de déplacer les points de complexité lors de la conception de système de commande ;
- De contrôler, dans des configurations particulières, plusieurs machines polyphasées à l'aide d'un seul convertisseur de puissance ;
- Enfin d'améliorer le comportement acoustique de la machine.

De par le nombre élevé de grandeurs indépendantes à contrôler, les ensembles polyphasés se trouvent être sur certains points fondamentalement différents des ensembles triphasés classiques. Du reste, ils ont largement alimenté des thèmes de recherche depuis les années 60 et plus particulièrement depuis le milieu des années 1990. Les paragraphes suivants font un état des outils spécifiques qui ont été développés pour la résolution des verrous scientifiques posés par les systèmes polyphasés.

1.2.1.1 Modélisation des ensembles polyphasés

Les bases mathématiques permettant la modélisation des machines polyphasées ont été posées dans la première moitié du 20ème siècle [Fortescue18], [Park29], [Clarke43], [Kron51]. Bien que développés historiquement de manières totalement indépendantes, on notera que tous ces travaux reposent sur des bases mathématiques communes, comme l'ont montré [Krause85] et [Figueroa06]. L'objectif de l'ensemble de ces travaux est de disposer d'outils simplifiant l'analyse de systèmes décrits par un ensemble d'équations différentielles couplées à paramètres variables.

L'application des méthodes de modélisation précédemment introduites se retrouve dans [White59] où une étude complète du processus de modélisation d'une machine polyphasée est proposée. La modélisation repose sur l'emploi de transformations (dites de Clarke, Concordia ou de Park généralisées à n phases) substituant aux variables réelles (tensions, courants et flux du modèle à paramètres localisés d'une machine polyphasée), des variables fictives qui amènent à des équations dynamiques découplées. De plus, l'emploi d'opérateurs de rotation permet d'obtenir des grandeurs constantes en régime permanent (point bien entendu très intéressant du point de vue de la commande). Le formalisme matriciel est utilisé dans l'ensemble des travaux précités. Notons que parallèlement à l'approche matricielle, Gabriel Kron développa une modélisation des systèmes

polyphasés basée sur l'approche tensorielle [Kron39] [Kron51]. Bien que plus puissant que l'outil matriciel, car pensé pour modéliser les systèmes anisotropes, il n'est que peu utilisé vu sa complexité, sauf cas particuliers [Vernet04].

L'hypothèse classique (au-delà de celles presque systématiques de linéarité magnétique et d'absence de pertes fer) consiste à considérer que, d'une part les phases sont symétriques (identiques et consécutivement déphasées d'un même angle) et, d'autre part, les forces magnétomotrices qu'elles engendrent sont à répartition spatiale sinusoïdale (les harmoniques d'espace sont négligés). Ces hypothèses permettent de modéliser une machine polyphasée par un circuit diphasé fictif (identique au modèle d'une machine triphasée couplée en étoile) auquel sont associés des circuits monophasés indépendants constitués par la mise en série de la résistance d'une phase et de l'inductance de fuite de la machine [Wilamowski11]. La Figure 1 montre une représentation de ces schémas pour une machine asynchrone polyphasée. Bien entendu, le nombre de variables après transformation devant être équivalent au nombre de variables avant transformation, **une machine à n phases sera donc modélisée par un circuit diphasé et $(n-2)$ circuits monophasés.**

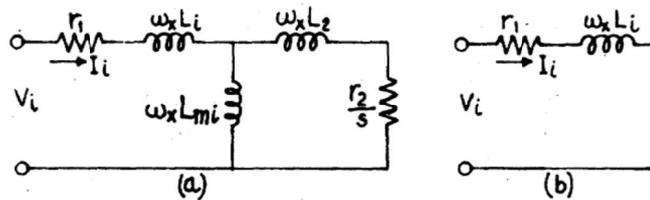


Figure 1 : Schémas équivalents à une machine polyphasée asynchrone [Klingshirn83-1]

(a) Circuit diphasé (b) $(n-2)$ circuits monophasés

Le groupe de machines, constitué par des ensembles de trois phases déphasées de 120° couplées en étoile et eux-mêmes déphasés d'un angle arbitraire (machines multi-étoiles), ne respecte pas a priori l'hypothèse de régularité spatiale entre les phases (machines polyphasées symétriques). Deux alternatives existent alors pour les modéliser. La première méthode consiste à retrouver le nombre initial de phases et leur à appliquer une transformation symétrique. Il suffit ensuite d'opérer les couplages série entre phases diamétralement opposées pour retrouver le modèle initial de la machine. On peut reprendre pour exemple la machine hexaphasée double étoile (machine à 6 phases asymétriques) qui sera dans un premier temps considérée comme équivalente à une machine à douze phases symétriques dont les phases diamétralement opposées sont connectées en série. La deuxième méthode consiste à trouver des transformations particulières aux machines asymétriques

comme dans [Nelson74]. Bien que plus directe, cette dernière méthode perd en généralité, puisqu'elle est uniquement applicable à un type de machine particulier.

La fin des années 60 voit l'arrivée de convertisseurs statiques alimentant les machines électriques. Bien que déjà sujet d'études [Alger47], [Pichoir63], la prise en compte des harmoniques dans le calcul des inductances des machines électriques est devenue alors essentielle avec l'alimentation des machines polyphasées par des onduleurs de tension. En effet, comme le montrent [Klingshirn68] et [Ward69] dès la fin des années 70, les harmoniques de tension engendrés par le découpage de la tension de bus par l'onduleur amènent à des pertes supplémentaires difficiles à évaluer si l'on conserve l'hypothèse que seul le fondamental de la force magnétomotrice est suffisant pour modéliser une machine polyphasée.

[Klingshirn83-1], [Klingshirn83-2] montre, par le biais des composantes symétriques, et vérifie par des mesures, qu'une machine polyphasée possède des inductances caractéristiques dépendantes d'un « groupe d'harmoniques » des grandeurs d'alimentation et du nombre de phases de la machine. Si l'on considère plusieurs harmoniques de force magnétomotrice, une machine polyphasée n'est donc plus équivalente à une machine triphasée couplée en étoile à laquelle seraient associés des circuits inductifs dus aux fuites, mais à un ensemble de circuits diphasés, chacun modélisant la production d'un couple et possédant une inductance particulière (cf Tableau 2). Notons que, si l'existence d'inductances particulières est admise, le calcul explicite de ces inductances n'est, à notre connaissance, pas proposé dans la littérature.

Number of phases		Phase belt angle	Sequence or set	Harmonics in set	Inductance for set
n=q	n=2q				
2	4	90°	1	1, 3, 5, 7, ..., $2v \pm 1, \dots$	L(1)
3	6	60°	1	1, 5, 7, 11, ..., $3v \pm 2, \dots$	L(1)
			3*	3, 9, ..., $3v, \dots$	L(3)
5	10	36°	1	1, 9, 11, 19, ..., $5v \pm 4, \dots$	L(1)
			3	3, 7, 13, 17, ..., $5v \pm 2, \dots$	L(3)
			5*	5, 15, ..., $5v, \dots$	L(5)
6	12	30°	1	1, 11, 13, 23, ..., $6v \pm 5, \dots$	L(1)
			3*	3, 9, 15, 21, ..., $6v \pm 3, \dots$	L(3)
			5	5, 7, 17, 19, ..., $6v \pm 1, \dots$	L(5)
9	18	20°	1	1, 17, 19, 35, ..., $9v \pm 8, \dots$	L(1)
			3*	3, 15, 21, 33, ..., $9v \pm 6, \dots$	L(3)
			5	5, 13, 23, 31, ..., $9v \pm 4, \dots$	L(5)
			7	7, 11, 25, 29, ..., $9v \pm 2, \dots$	L(7)
12	24	15°	9*	9, 27, ..., $9v, \dots$	L(9)
			1	1, 23, 25, ..., $12v \pm 11, \dots$	L(1)
			3*	3, 21, 27, ..., $12v \pm 9, \dots$	L(3)
			5	5, 19, 29, ..., $12v \pm 7, \dots$	L(5)
			7	7, 17, 31, ..., $12v \pm 5, \dots$	L(7)
12	24	15°	9*	9, 15, 33, ..., $12v \pm 3, \dots$	L(9)
			11	11, 13, 35, ..., $12v \pm 1, \dots$	L(11)

* Currents for these sets can be eliminated by the connections alone.

Tableau 2 : Différentes inductances associées à une machine polyphasée et son groupe harmonique caractéristique [Klingshirn85]

Enfin, faute de pouvoir agir de façon plus performante sur le contrôle des interrupteurs constituant les onduleurs polyphasés, on trouvera dans [Klingshirn85] des filtres polyphasés particuliers permettant d'atténuer les harmoniques de courants dus aux harmoniques de tension induits par le découpage, sans en atténuer le fondamental majoritairement à l'origine de la production du couple. La complexité et la taille de ces filtres mettaient en évidence que l'alimentation par onduleur de tension pleine onde des machines polyphasées n'était pas une solution économiquement viable à grande échelle et qu'il valait mieux conserver l'alimentation largement répandue par commutateurs de courant.

En résumé, les machines polyphasées nécessitent des outils de modélisation permettant d'appréhender de façon intrinsèque les « groupes harmoniques » caractéristiques indépendants qui leurs sont associés. Le formalisme matriciel, auquel est associé une infinité de transformations matricielles, ne permet pas d'affirmer le caractère unique de la décomposition de la machine polyphasée suivant ces groupes.

Dotés d'interrupteurs pouvant commuter rapidement et de systèmes programmables pour la commande, le milieu des années 90 a ouvert les travaux sur la modélisation et la commande en Modulation de la Largeur des Impulsions des onduleurs de tension polyphasés. Le formalisme matriciel ne présentant pas toutes les qualités pour développer une approche synthétique, [Zhao95] propose d'utiliser les vecteurs d'espace multidimensionnels pour représenter les différentes tensions que les onduleurs de tension polyphasés génèrent. Chaque circuit diphasé ou monophasé indépendant (modélisant par leur association le comportement de la machine polyphasée) se trouve être alimenté par des tensions, résultat des combinaisons des interrupteurs, représentées par des vecteurs d'espace à une ou à deux dimensions. Ces vecteurs sont obtenus par projection sur des espaces caractéristiques associés à la machine du vecteur d'espace à n dimensions. Imposer un vecteur tension à la machine polyphasée revient alors à imposer un vecteur tension à une ou deux dimensions à chacun des circuits monophasés et diphasés équivalents. En présence alors de sous-espaces de type « plan », le formalisme des phaseurs complexes peut donc être introduit de façon naturelle.

La Figure 2 montre la représentation des projections des différents vecteurs d'espace alimentant les circuits équivalents à une machine asynchrone hexaphasée, dénommés (dq) , (z_1z_2) et (o_1o_2) [Zhao95]. Dans le cadre de ces modélisations, les interrupteurs statiques sont considérés comme parfaits, c'est-à-dire sans pertes et commutant de façon instantanée.

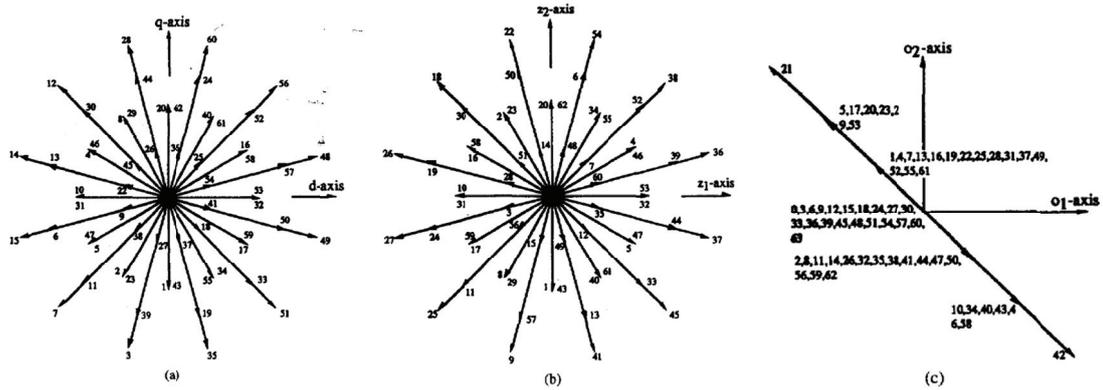


Figure 2 : Représentation des différents vecteurs d'espace alimentant les trois circuits diphasés équivalents à une machine à six phases [Zhao95]

En résumé, les vecteurs d'espace forment un outil bien adapté à la représentation des onduleurs de tension polyphasés. On verra d'ailleurs que l'approche vectorielle devient de la plus haute utilité lors de la présence de saturations.

L'étude de la fiabilité des ensembles polyphasés est un sujet assez ancien [Jahns80]. Bien que les pannes puissent être d'origine tant mécanique qu'électrique, il est reconnu que les défauts les plus fréquents proviennent des semi-conducteurs, des drivers ainsi que des condensateurs composant le système d'alimentation de la machine [Julian07] [Yang11] [Bennett12]. Les différentes études concernant l'accroissement de la fiabilité des ensembles électromécaniques se sont alors tournées majoritairement vers les défauts d'alimentation et particulièrement ceux engendrés par l'onduleur [Welchko04]. La Figure 3 illustre les différents défauts, se résumant en la mise en court-circuit ou en circuit ouvert d'une phase, que peuvent présenter les onduleurs de tension.

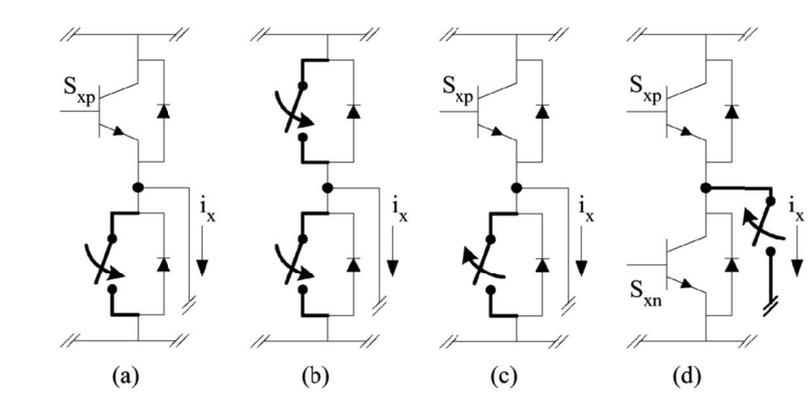


Figure 3: Différents défauts associés à un bras d'onduleur: (a) court-circuit d'un interrupteur, (b) court-circuit d'un bras d'onduleur, (c) ouverture d'un interrupteur, et (d) ouverture d'une phase [Welchko04].

Deux grandes stratégies de modélisation des ensembles polyphasés en mode dégradé d'alimentation se dégagent dans la littérature.

La première idée consiste à considérer que le système perd un nombre de phases correspondant au nombre de défauts et devient de fait asymétrique. En l'absence de couplage (étoile ou polygonal), il suffit alors soit de retirer un nombre d'équations en tension équivalent au nombre de courants nuls dans le cas de défaut « phases ouvertes », soit d'imposer une tension de phase nulle dans le cas de phases en court-circuit [Martin00]. La présence d'un couplage entre les phases rend un peu plus difficile cette approche nécessitant, par exemple lors d'un couplage étoile, de recalculer pour chaque cas différent de défaut la tension entre le neutre de la machine et un potentiel de l'onduleur [Robert-Dehault05]. On a alors autant de modèles à développer que de cas de défaut possibles, rendant cette technique difficilement applicable à des systèmes possédant un nombre élevé de phases.

La deuxième idée consiste à trouver une nouvelle transformation permettant de découpler le système asymétrique dû à la perte d'alimentation d'une ou plusieurs phases [Zhao96-1]. A chaque machine particulière et à chaque cas particulier de défaut d'alimentation une nouvelle transformation doit donc être appliquée, qui d'ailleurs impose souvent l'utilisation de techniques d'orthogonalisation particulièrement lourdes à manipuler et nécessitant un savoir-faire préalable pour aboutir à une solution acceptable [Gataric00]. Le nombre de transformations différentes à développer devient très vite trop important pour généraliser cette méthode à des machines à nombre de phases important. Notons néanmoins que cette stratégie permet de conserver (en régime dégradé d'alimentation et sous certaines hypothèses) des courants transformés constants en régime permanent, permettant ainsi de conserver des correcteurs de type Proportionnel Intégral pour asservir les courants [Ryu06].

Précisons enfin qu'une alternative à ces méthodes consiste à conserver le modèle initial (en mode normal) auquel on ajoute des tensions, engendrées par les défauts d'alimentation [Krause65]. Ces tensions additionnelles peuvent être ajoutées, soit dans le modèle écrit avec les variables naturelles [Fei11], soit dans le modèle écrit avec des variables découplées déterminées en mode normal [Bolognani00]. Cette méthode, qui consiste à remplacer la tension d'alimentation d'une phase par la tension à vide de façon à annuler le courant qui y circule, est identique dans son esprit à celle qui consiste à recalculer la tension neutre machine/onduleur après un défaut.

En résumé, la modélisation des machines polyphasées en mode d'alimentation dégradé implique qu'à chaque défaut soit associé un nouveau modèle, rendant difficile la généralisation des méthodes proposées à un nombre de phases élevé.

1.2.1.2 Contrôle rapproché des convertisseurs d'électronique de puissance polyphasés

Si les premières machines polyphasées industrielles possédaient six phases montées en double étoile et ne pouvaient être, pour des raisons technologiques, qu'alimentées par des onduleurs de courant pleine onde, les inconvénients inhérents de ce type de contrôle ont vite amené à s'intéresser une alimentation par onduleurs de tension.

Comme indiqué dans le paragraphe précédent dédié à la modélisation, [Klingshirn68] et [Ward69] ont étudié l'effet de l'alimentation par onduleur de tension des machines polyphasées. Ils ont ainsi montré que des groupes harmoniques des tensions onduleur étaient associés à une valeur spécifique d'inductance, générant alors des courants harmoniques qui peuvent dans certains cas n'être limités que par l'inductance de fuites de la machine. [Pavithran88] a alors analysé l'effet de tensions pleine onde, auxquelles on supprime les harmoniques 3 puis 9 et 11 (MLI calculée) et de tension obtenue par MLI intersective. Dans ce dernier cas, la réduction des courants harmoniques est alors importante même si l'auteur rappelle en conclusion que la fréquence de commutation des interrupteurs est encore limitée pour espérer obtenir des spectres de courants comparables à ceux obtenus avec un ensemble triphasé.

La commande par MLI intersective a été tout d'abord appliquée aux machines double étoile. Ces machines sont en effet intéressantes dans la mesure où chaque étoile est alimentée par un onduleur triphasé classique, les commandes étant décalées d'un angle de 30°. [Moubayed98] montre que des courants harmoniques très importants peuvent apparaître si les commandes ne sont pas synchronisées. Cette remarque est très importante dans la mesure où elle confirme que les ensembles polyphasés alimentés en tension ne peuvent être contrôlés sans prendre en compte à la fois les couplages internes au système et l'ensemble des grandeurs, c'est-à-dire sans **adopter une analyse vectorielle et non multi-scalaire**.

L'approche vectorielle est introduite dans [Zhao95] comme présenté dans le paragraphe précédent concernant la modélisation des onduleurs. Zhao développe une commande MLI vectorielle de l'onduleur (Space Vector PWM) pour alimenter une machine double étoile. Pour cela, il sélectionne cinq vecteurs à activer pendant une période de MLI. Cela correspondant à un nombre de

vecteurs amenant à une solution unique du calcul de leurs temps d'activation. Son choix se porte vers la sélection de vecteurs tels qu'ils excitent de façon importante le plan principal (lié au premier harmonique, seul générateur de couple dans le cas présenté) et peu les autres plans (liés aux inductances de fuite et donc seuls générateurs de courants parasites). Le calcul des temps d'activation est obtenu par la résolution d'un système matriciel de dimension 5×5 à chaque période de MLI. A ces calculs s'ajoutent ceux qui permettent de localiser le vecteur de référence de façon à activer les cinq vecteurs les plus proches et ainsi réduire les ondulations de courant. Si rien de particulier n'est indiqué dans l'article, on suppose que la localisation du vecteur fait appel à des fonctions trigonométriques tabulées dans une mémoire, mais gourmande en taille si l'on souhaite une précision acceptable de la localisation du vecteur.

La méthode initiée dans [Zhao95] est maintenant devenue un standard auquel on ajoute des analyses particulières suivant les besoins. Parmi ceux-ci, une utilisation optimale des tensions onduleur anime les recherches sur les onduleurs polyphasés [Dujic08]. Le mode de fonctionnement dit « défluxé », abordé au paragraphe 1.2.1.4 de cette partie et dédié au calcul des références de courant, en est un exemple probant.

Il existe assez peu de commandes aux valeurs instantanées des machines polyphasées (Direct Torque Control) même si dans le principe il suffit d'appliquer les principes de commandes DTC développées pour les machines triphasées. En effet, la sélection du vecteur tension (parmi 2^n vecteurs disponibles de dimension n) se fait à l'aide d'une table préprogrammée de grande taille et de fait difficile à compléter. Un premier essai de DTC appliqué aux machines polyphasées se trouve dans [Toliat00] où les auteurs opèrent une simplification qui consiste à ne commander qu'un seul plan dq de la machine. Cette simplification n'est acceptable que dans la mesure où l'impédance associée aux autres plans dq de la machine est suffisante pour limiter les courants harmoniques parasites. Les seuls et rares travaux que l'on trouve se concentrent exclusivement sur la machine double-étoile. Les travaux les plus aboutis sont proposés par [Hatua05] qui utilise de façon adroite la théorie des vecteurs d'espace associés à chaque plan dq et leur propriétés d'indépendance.

En résumé, le formalisme vectoriel propose d'une part un outil d'analyse pertinent, par exemple des commandes MLI intersectives appliquées à la commande des onduleurs polyphasés, et, d'autre part, de permettre la réalisation de commandes par vecteur d'espace. Néanmoins, et bien que cela soit une étape nécessaire, le passage trop rapide à des expressions matricielles mène à des systèmes d'équations qui nécessitent des moyens de calcul en temps réel importants lorsque le nombre de bras de l'onduleur augmente.

1.2.1.3 Formalismes de représentation et structures de commande

La structure de commande d'un système, si elle se veut performante, doit être adaptée à la structure interne du système. Paradoxalement, assez peu de travaux ont été menés concernant la déduction de structures de commande de systèmes polyphasés à partir d'une représentation formalisée du modèle. En effet, les structures de commande sont classiquement réalisées par des boucles imbriquées, partant des asservissements de courants (décomposés en composantes à l'origine de la production de flux et composantes à l'origine de la production de couple) pour arriver à un asservissement de vitesse et/ou de position. La Figure 4 montre une représentation symbolique d'un ensemble convertisseur-machine polyphasé issu du chapitre 24 de [Wilamowski11].

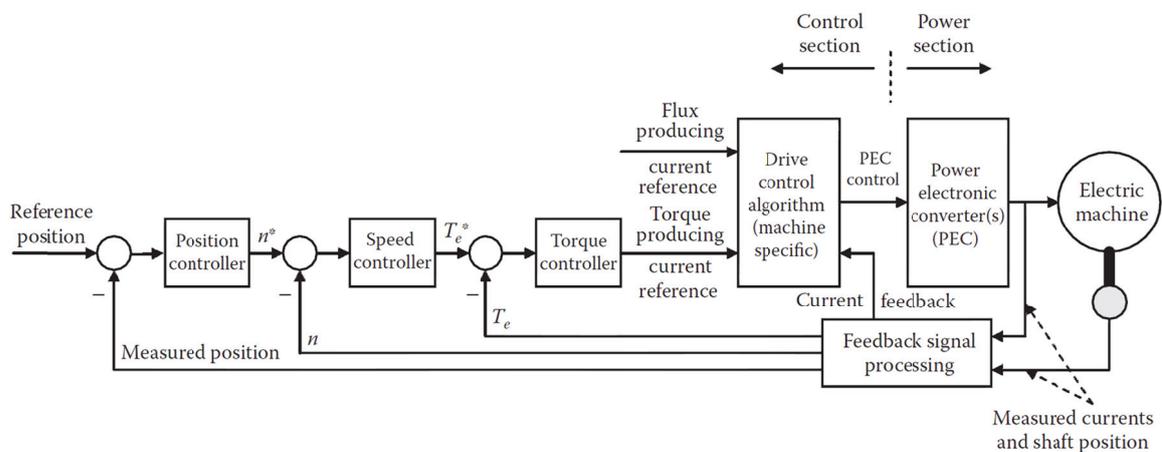


Figure 4 : Représentation schématique d'un ensemble polyphasé [Wilamowski11].

La structure de commande est soit déduite à partir du modèle écrit avec les variables naturelles (généralisation des commandes dites en « abc »), soit avec les variables obtenues après transformations (commandes dites en « $\alpha\beta$ » ou « dq »).

Dans une approche classique aux valeurs moyennes, les courants sont asservis par des correcteurs de type PI si on estime que l'erreur de traînage qu'ils imposent n'est pas trop importante, ou par des correcteurs à Hystérésis. Notons que certains auteurs ont utilisé des contrôleurs à mode glissant d'ordre élevé pour éviter les inconvénients des correcteurs à Hystérésis tout en bénéficiant des propriétés des correcteurs à structure variable [Utkin93] [Fnaiech10] [Betin12]. Enfin, des anticipations ou compensations judicieusement placées, correspondant par exemple en mode dégradé aux tensions additionnelles engendrées par les défauts d'alimentation, permettent d'obtenir des performances intéressantes tout en conservant des correcteurs aux performances classiques [Bianchi03].

Les formalismes de représentation associés se limitent à une écriture matricielle des équations de la machine sous forme d'équations d'état. Notons que [Zanasi10] représente les systèmes polyphasés à l'aide du Power Oriented Graph (POG). Ce formalisme permet la représentation des équations d'état d'un système par le biais de schémas blocs respectant une des règles du Bond Graph, règle qui permet de retrouver la puissance instantanée en chaque point du modèle par le produit de deux variables, l'une cinétique et l'autre potentielle. A notre connaissance, le POG n'a pas été développé pour aider à la déduction de structures de commande.

En résumé, il n'apparaît pas, à notre sens dans la littérature, de formalismes de représentation des systèmes polyphasés permettant une aide directe à la déduction des structures de commande.

1.2.1.4 Calcul des références de courant

Quelle que soit la structure de commande choisie (type « *abc* », « $\alpha\beta$ » ou « *dq* ») et le mode de fonctionnement (sain ou en défaut), les différentes références de courant doivent être déterminées à partir de la référence de couple, du niveau de flux souhaité dans la machine et de contraintes associées (minimisation des ondulations de couples, des pertes, valeurs maximales admissibles, ...), voir la Figure 4 pour illustration.

En mode de fonctionnement normal, la grande majorité des travaux reposent naturellement sur la génération d'un couple constant à pertes Joules minimales. Pour cela, l'hypothèse du premier harmonique, issue de l'étude des machines triphasées, est souvent retenue et les références de courant sont sinusoïdales dans le cas d'une commande en « *abc* » et « $\alpha\beta$ » ou bien constante en régime permanent dans le cas d'une commande en « *dq* ». L'étude des machines asynchrones polyphasées a montré qu'il était possible, lorsque la fonction de bobinage contenait des harmoniques autres que le fondamental, d'augmenter le couple massique de la machine [Toliyat91-1] [Toliyat91-2]. Dans cet esprit, [Lyra02] propose d'ajouter un harmonique trois de courant aux références sinusoïdales, permettant ainsi d'augmenter la densité de couple d'une machine asynchrone à six phases.

L'augmentation de la valeur des champs rémanents des aimants permanents permet aux machines synchrones d'atteindre désormais de meilleures caractéristiques que les machines asynchrones. Beaucoup de travaux ont alors, depuis les années 2000, émergé sur les machines synchrones polyphasées à aimants permanents, notamment concernant les machines à forces électromotrices non sinusoïdales avec optimisation des références de courants [Parsa05-1].

En mode de fonctionnement normal, tant que le rang maximal des harmoniques considéré est inférieur au nombre de phases, le calcul des références de courant est simplifié grâce à la propriété du découplage entre groupes d'harmoniques caractéristiques associés à une machine. L'emploi d'une transformation de Park généralisée à un nombre de phases supérieur à trois permet d'ailleurs d'obtenir des grandeurs constantes en régime permanent, un couple de composantes dq découplées des autres étant associé à chacun des harmoniques.

Le mode de fonctionnement avec phases ouvertes a mené au développement d'une thématique de recherche à part entière sur le calcul des références de courant des machines polyphasées. Les recherches d'antériorité mènent à [Liu93] qui présente le contrôle d'une machine triphasée couplée en étoile avec point neutre connecté au point milieu capacitif du bus de tension. Dans cette étude il montre qu'il est possible avec deux courants indépendants de générer la même force magnétomotrice (et donc de conserver le même couple) qu'avec trois courants alimentant un bobinage triphasé couplé en étoile. Le principe du calcul, en faisant l'hypothèse du premier harmonique, repose sur la résolution d'un système à deux équations (l'expression des forces magnétomotrices en mode normal et dégradé) et à deux inconnues (les courants à injecter dans les deux phases encore alimentées après le défaut).

[Fu94] a étendu ce principe aux machines polyphasées. Disposant de plus de degrés de liberté (plus de courants contrôlables) qu'avec les machines triphasées, il montre qu'il existe plusieurs stratégies suivant les contraintes choisies. Conservant l'hypothèse du premier harmonique, il montre qu'on peut obtenir des références de courants soit en choisissant de minimiser les pertes Joules (point de vue de la machine), soit en choisissant d'imposer la même valeur maximale à chacun des courants (point de vue de l'onduleur). Il s'agit là aussi de résoudre un système matriciel de n équations à n inconnues.

Enfin, dans [Wang03] et [Dwari08] pour une machine pentaphasée à aimants permanents et à forces électromotrices non sinusoïdales, il s'agit de calculer les références de courant optimales permettant d'obtenir un couple constant tout en minimisant les pertes Joules lorsque des phases sont ouvertes. Le problème, écrit sous forme matricielle, semble ne pas avoir de solution unique et les auteurs utilisent alors une méthode basée sur les multiplicateurs de Lagrange. L'expression obtenue des courants, bien qu'exacte, ne permet qu'une difficile interprétation, la méthode mathématique employée ayant détourné le problème concret (physique) en un problème mathématique d'optimisation.

Depuis peu, les machines polyphasées ont été étudiées en régime de fonctionnement défluxé. Pour un niveau de couple donné, à partir d'une certaine vitesse les tensions nécessaires pour alimenter la machine arrivent aux limites de la tension de bus disponible. Il faut alors changer de stratégie et, plutôt que de limiter les pertes Joules, il devient nécessaire d'injecter un courant démagnétisant (dit d'axe d) pour accélérer la machine sans perte de contrôlabilité. Les techniques de défluxage des machines triphasées (couplées en étoile) sont matures [Dongyun10], [Bolognani11] et ne sont plus abordées que dans des cadres spécifiques comme la prise en compte explicite des résistances dans le calcul des références de courant, des non linéarités engendrées par l'onduleur ou du couple réluctant généré [Liu12].

Pour les machines polyphasées, qui possèdent un nombre de courants d'axe d supérieur à un, sous certaines hypothèses classiquement admises, on peut alors modifier de façon indépendante plusieurs harmoniques de flux. Le problème consiste alors à déterminer quel harmonique il est préférable de défluxer. La difficulté majeure de la mise en œuvre du défluxage d'une machine polyphasée réside dans le fait que la tension maximale exploitable pour un harmonique (dans un plan dq) dépend de l'amplitude mais aussi de la phase, du vecteur tension imposé dans un autre plan dq (pour contrôler un autre harmonique de courant). Cette difficulté est détournée en faisant le choix des tensions limites de façon heuristique, comme dans [Parsa05-2] qui étudie le défluxage d'une machine pentaphasée synchrone à aimants permanents, ou en formulant des hypothèses simplificatrices interdisant de ce fait d'exploiter le maximum des capacités de l'ensemble polyphasé.

A notre connaissance, la détermination des tensions limites qui peuvent être fournies par un onduleur polyphasé a été mentionnée pour la première fois dans [Casadei08] et [Levi08-2]. Pour déterminer ces limites, le formalisme des vecteurs d'espace est utilisé pour modéliser l'onduleur mais, le calcul analytique semblant ne pas mener à une solution simple, la tension maximale admissible est calculée en ne considérant que l'amplitude des différents vecteurs de tension de références dans chacun des plans dq , c'est-à-dire en considérant que tous les vecteurs sont en phase. Cette approche scalaire du problème, si elle amène à une grande simplification calculatoire et à une expression analytique relativement simple, ne permet pas d'exploiter au mieux les capacités de l'onduleur de tension en se ramenant en permanence au cas le plus critique.

Les rares articles dédiés au défluxage des machines polyphasées reposent sur l'hypothèse précédemment formulée [Casadei10], [Song11].

En résumé, en mode non défluxé (normal comme dégradé) le calcul des références de courant est basé sur la résolution d'un système matriciel qui, en dehors de l'hypothèse du premier harmonique, semble ne pas toujours apporter de solution unique et nécessite alors le recours à des techniques d'optimisation. En mode défluxé, bien que soit introduit le formalisme des vecteurs d'espace, une approche scalaire est retenue pour la détermination des limites atteignables, ce qui amène à une sous-utilisation des potentialités de l'onduleur de tension.

1.2.2 Robot de type Gantry

1.2.2.1 Les robots polyarticulés

Les robots polyarticulés, introduits dans l'industrie de production depuis les années cinquante, forment un groupe particulièrement utilisé des systèmes de positionnement industriels. Ils sont constitués de parties mécaniques en liaison prismatique ou rotoïde (permettant des mouvements relatifs de translation ou de rotation) chacune mue par un actionneur. Un robot polyarticulé est caractérisé géométriquement par son nombre d'axes (mus par un actionneur), son architecture (série ou parallèle), le chaînage de ses articulations et son nombre de degrés de liberté.

Le robot polyarticulé antropomorphe, comme celui de la société STAUBLI donné à la Figure 5(a) est sûrement le plus connu. Il s'agit d'un robot 6 axes série 6R (Rotoïde) à six degrés de liberté. La Figure 5(b) présente un robot parallèle dit robot araignée de la société ABB.



Figure 5 : Robots (a) antropomorphe - série et (b) araignée - parallèle

Les robots série ont des caractéristiques opposées à celles des robots parallèles. Ils possèdent un volume de travail important mais une dynamique et une précision faibles.

Les robots de type gantry (« portique » en français) sont des robots cartésiens constitués d'une poutre qui se déplace de façon perpendiculaire à deux axes parallèles, constituant ainsi la structure d'un portique (Cf. Figure 6). Cette poutre forme un axe de déplacement supplémentaire pour une

tête sur laquelle peut être monté un outil quelconque (allant d'une caméra à une broche outil). Poutre et tête forment alors un système de déplacement cartésien dit en XY. Un seul axe parallèle sur les deux peut être motorisé et on parle alors de gantry mono-actionné ou cartésien série. Le porte-à-faux induit par la poussée en une seule extrémité de la poutre amène à une sollicitation mécanique importante des liaisons ainsi que de la poutre et réduit les performances du système. On augmente ce niveau de performances en rétablissant une symétrie dans les forces de poussée de la poutre, grâce à deux actionneurs placés à chaque extrémité. Le gantry est alors bi-actionné et devient un robot cartésien hybride (parallèle et série). La Figure 6 donne une représentation schématique des deux configurations.

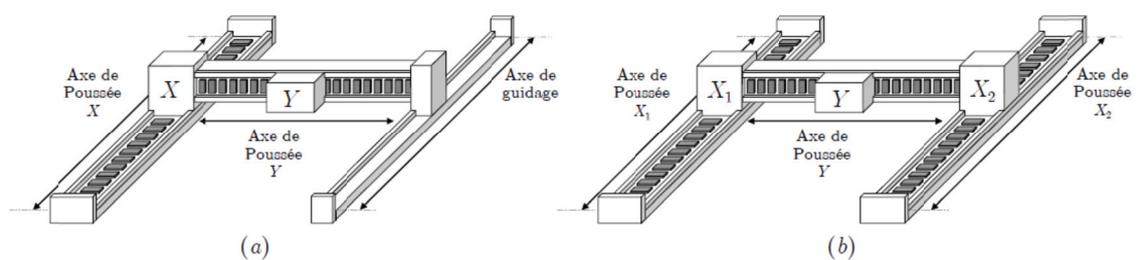


Figure 6 : Représentation des configurations (a) mono-actionnée et (b) bi-actionnée d'un robot en gantry

Les axes en gantry bi-actionnés posent deux problèmes spécifiques qui dégradent leurs performances, à savoir, le couplage mécanique entre les actionneurs et les vibrations de la poutre transversale. Le paragraphe suivant passe en revue les méthodes de modélisation et de commande de tels systèmes que l'on rencontre dans l'industrie comme dans la littérature.

1.2.2.2 Revue des différentes modélisations des robots en gantry bi-actionnés

Si la poutre est assez rigide et que la dynamique de chaque axe n'est pas trop importante, on peut considérer que les deux extrémités se déplacent de façon synchrone et que la poutre ne vibre pas. On arrive alors à un modèle constitué de deux fonctions de transfert complètement indépendantes. Cette approche multi-scalaire est très souvent celle retenue par le monde industriel qui se doit de pouvoir fournir des produits que l'utilisateur pourra prendre en main et a priori régler aisément.

Ce modèle, bien que simpliste, est pourtant prisé par les automaticiens spécialistes de la commande optimale, floue, répétitive ou robuste. En effet, ce modèle simple correspond à un modèle nominal auquel on peut adjoindre des incertitudes paramétriques (la non prise en compte

des phénomènes vibratoires par exemple) ou incertitudes dans les perturbations extérieures (efforts dus aux couplages par la poutre entre les deux moteurs parallèles) [Hu11].

Un modèle simple qui permet de prendre en compte un couplage entre les deux actionneurs consiste à supposer la poutre comme rigide et mue par deux forces appliquées à chacune de ses extrémités. Une masse en mouvement linéaire le long de la poutre permet de prendre en compte la dissymétrie de répartition de masse entre les deux axes parallèles [Teo07]. Ce modèle est adapté au cas particulier des axes très rigides, équipés de dispositifs de guidage sans frottement (coussins d'air) et entraînés par des moteurs linéaires sans fer. Cependant, pour les applications à forte dynamique, les moteurs synchrones comportant un primaire à noyau ferromagnétique sont généralement préférés car ils présentent un meilleur rapport force/surface active que les moteurs sans fer. Pour cette technologie d'actionneurs, la masse de la partie mobile ne peut alors plus être négligée lors de la modélisation de l'axe. De plus, afin de limiter le degré d'hyperstaticité de la structure, les actionneurs sont généralement reliés aux deux extrémités de la poutre du gantry par le biais d'éléments de liaison, plus ou moins flexibles.

[Park01] propose un modèle du gantry dans lequel la poutre, considérée comme flexible, est reliée aux moteurs par le biais de liaisons flexibles. Cette étude étant menée uniquement dans le but d'analyser l'influence des raideurs de liaison sur la flexion de la poutre, les extrémités de la poutre sont considérées fixes par rapport au bâti. Le déplacement de la poutre le long des axes parallèles n'est pas modélisé (seuls les modes flexibles des liaisons et de la poutre sont considérés, le mode rigide n'est pas modélisé) et rend de fait le modèle incomplet. En général, les modèles poutres (continus) sont écrits avec l'hypothèse d'Euler-Bernoulli puis discrétisés en ne conservant que les n premiers modes de la poutre suivant le degré de précision du modèle souhaité.

Enfin, on trouvera dans [Yang03] et [Yu03] des modèles à fonctions de transfert croisées qui permettent de représenter de façon graphique les équations du modèle, à deux entrées et deux sorties présentant des couplages, initialement écrites sous forme d'état. Ces modèles mathématiques possèdent un nombre plus ou moins important de paramètres qui définissent leur degré de précision.

La Figure 7 illustre les différents modèles que l'on rencontre dans la littérature. De haut en bas et de droite à gauche, on trouve le modèle sans couplage, le modèle rigide (sans considération des modes flexibles), le modèle flexible (sans considération du mode rigide) et le modèle à fonctions de transfert croisées.

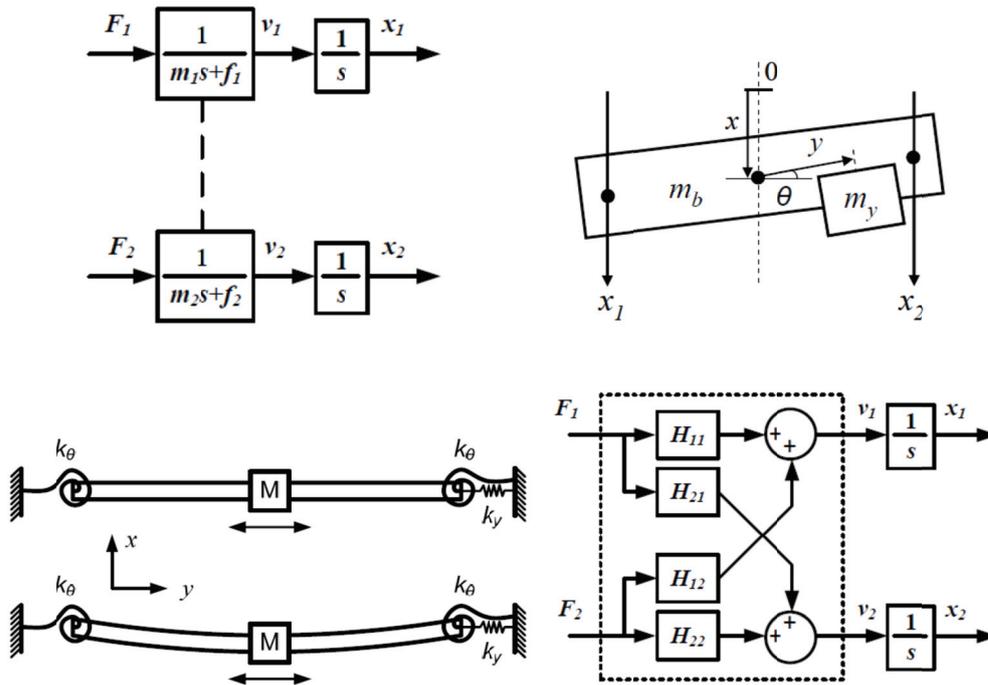


Figure 7 : Différents modèles de gantry bi-actionnés rencontrés dans la littérature

En résumé, il est difficile de trouver un modèle générique, à paramètres physiques, modélisant le comportement dynamique, rigide comme flexible, d'un gantry bi-actionné et permettant, à partir de son organisation, de déduire une structure du système de commande. Il est nécessaire, de plus, de disposer d'un outil permettant de vérifier que la représentation du modèle soit minimale (tous les états du système sont observables et commandables) afin que la commande déduite soit performante (car en respect avec la physique du système).

1.2.2.3 Revue des différentes stratégies de commande des robots en gantry bi-actionnés

Les structures de commande utilisées pour la commande des systèmes multi-actionnés sont assez nombreuses. Elles sont directement issues de la commande des systèmes MIMO et adaptées au cas particulier des systèmes en gantry bi-actionnés. On trouvera par exemple une classification de techniques d'asservissement adaptées aux axes souples dans [Colas07] et un panorama des méthodes adaptées au contrôle des systèmes MIMO dans [Fossard97].

Une solution industrielle ancienne consiste à réaliser un asservissement de type maître-esclave [Tan04]. Un des deux axes parallèles est asservi à la référence alors que le deuxième axe est asservi

au premier. Simple et aisément généralisable à une structure à n actionneurs en parallèle, cette solution n'est valable que pour des applications à faible dynamique, le moteur esclave ne pouvant être qu'en retard par rapport au moteur maître (contrôle de ponts roulants par exemple).

Une solution simple consiste à commander les différents actionneurs de façon complètement indépendante les uns des autres [Tan04]. Les correcteurs choisis sont de type PID dans un cadre d'utilisation industrielle ou d'ordre élevé s'ils sont issus de la théorie des systèmes optimaux, flous ou encore robustes. Les performances obtenues par ce type de commande dépendent alors directement de la nature des couplages entre les axes du système.

Si les couplages dégradent de façon importante les performances, il faut ajouter aux correcteurs indépendants des termes de compensations des couplages, l'objectif ultime étant de transformer le système à entrées multiples et une somme de systèmes mono-entrées indépendants. Ce type de commande est dénommée « commande par découplage ».

La première idée consiste à générer les termes de compensation à partir d'asservissements, ceci évitant la modélisation du couplage. Ce type de commande est retrouvé sous le terme de « commandes synchronisantes ». [Kim00] propose de corriger l'erreur de synchronisme en position par un correcteur à actions proportionnelle et dérivée (PD) et [Yang03] de corriger l'erreur de synchronisme en vitesse par un correcteur à actions proportionnelle et intégrale (PI). Enfin, [Kim03] corrige à la fois les deux erreurs de synchronisme en ajoutant deux correcteurs proportionnels dont les paramètres de réglage sont déterminés par une approche optimale de type LQR (Linear Quadratic Regulator). Bien qu'on pourrait penser que l'ajout d'un correcteur supplémentaire ne peut faire que mieux, ces auteurs n'ont pas pris la peine de s'assurer que toutes les grandeurs d'état étaient déjà asservies (minimalité de la représentation du modèle choisi). Les différents correcteurs (dont un complètement inutile, voire nocif) sont donc réglés de façon heuristique pour qu'ils n'aient pas d'effets antagonistes, ceci rendant impossible la formalisation et la généralisation de la méthode à d'autres systèmes.

Si le couplage mécanique entre les axes est modélisé, il semble être suffisant de compenser le couplage par des termes calculés à partir du modèle. À première vue, la méthode semble séduisante. Dans la pratique, elle ne l'est pas pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les termes de compensation peuvent être d'une grande complexité car théoriquement irréalisables (s'ils comportent plus de zéros que de pôles ou en d'autres termes ne respectent pas la causalité intégrale). Il est alors nécessaire de filtrer ces termes pour s'assurer de l'existence d'une causalité physique. Enfin, ces termes sont d'une

grande sensibilité à une variation des paramètres et peuvent créer des modes non-commandables, ce qu'il faut absolument éviter.

Les termes de compensation de couplage (comme les termes de compensation des autres éléments du système) peuvent être obtenus par anticipation (feedforward), ce qui peut conférer au système de très bonnes performances à condition que les incertitudes paramétriques du modèle ne soient pas trop importantes [Devasia00]. Notons que les termes de feedforward ne peuvent être générés que si la référence est connue à l'avance (trajectoire planifiée) et qu'elle possède un degré de dérivabilité suffisant [Lambrechts05]. La difficulté de l'élaboration des termes de feedforward réside dans la précision du modèle et de son organisation. Cette technique est à rapprocher de la théorie des systèmes plats développée par Fliess dans les années 1990 [Fliess94], [Zambettakis07].

Nous terminons cet état des lieux de la commande des systèmes gantry bi-actionnés en rappelant le principe de la commande modale, ou dénommée « commande découplante ». Initialement développée par [Rosenbrock62] suite aux travaux de Kalman sur la représentation par systèmes d'état, la commande modale consiste à générer des signaux de commande qui agissent directement et indépendamment sur les modes du système (Independent Modal Space Control). L'application de la commande modale aux systèmes multi-actionnés a été vulgarisée par Meirovitch dès les années 80 [Meirovitch90]. A partir du modèle écrit sous la forme d'une équation matricielle dynamique, une transformation, dite modale, vient diagonaliser les matrices de masse, de raideur et de frottement et substitue aux variables réelles des variables transformées (ou modales). **Dans le principe, la commande modale appliquée aux systèmes mécaniques est dans le même esprit que les transformations de Fortescue ou de Concordia appliquées aux machines électriques.** Notons qu'à la différence des enroulements des machines électriques, les composants des systèmes mécaniques ne présentent pas les mêmes symétries, cela rendant l'obtention de la matrice de transformation délicate (comme lorsque la machine devient asymétrique après la perte d'une phase). L'application, dans sa version la plus simple, de la commande modale à un gantry bi-actionné a été brevetée par [Tanquary00]. Cette commande ne cherche pas à totalement découpler le système mais à réduire l'effet des coupages. En ce sens, elle peut être qualifiée de commande dans une base de pseudo-découplage.

La Figure 8 montre les représentations schématiques de trois structures de commande d'axes en gantry bi-actionnés, c'est-à-dire de façon : indépendante, par découplage ou découplante (modale).

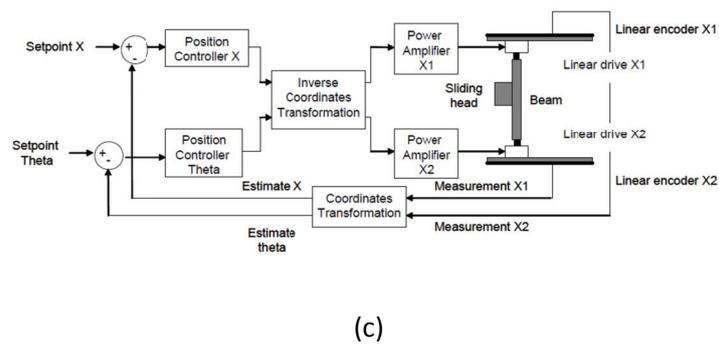
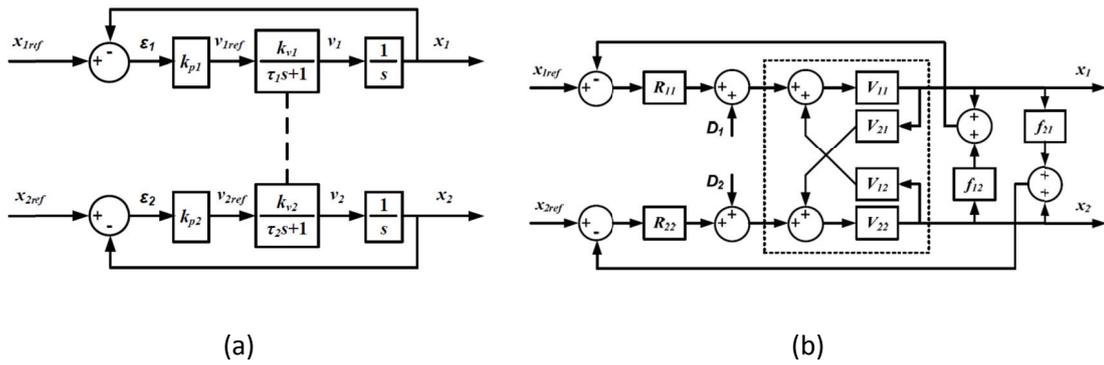


Figure 8 : Représentation schématique des structures de commande des axes de façon : (a) indépendante, (b) par découplage ou (c) modale (découplante)

En résumé, si toutes les techniques de commande qui existent dans la littérature peuvent être ou ont été) appliquées à la commande des systèmes gantry bi-actionnés, il n'existe pas d'outil d'aide à la déduction de structures de commande. En particulier, la complexité des systèmes à entrées multiples et l'absence de modèles fidèles et minimaux (au sens de l'automatique) peuvent mener facilement à des erreurs, entraînant le choix d'une structure de commande en contradiction avec la physique même du système à commander. Dans la littérature on trouve soit des modèles complexes (fidèles) et peu de commandes associées, soit des modèles simples (simplistes) et des commandes complexes.

Enfin, la commande modale, dans le même esprit que les commandes dans la base de Concordia d'une machine électrique, permet en théorie de contrôler le système avec des correcteurs simples et indépendants. En pratique, l'obtention d'une base de découplage est telle que le découplage n'est pas parfait. Se pose alors la question de la légitimité des simplifications nécessaires à faire pour obtenir une pseudo base de découplage, néanmoins intéressante. La déduction de transformations à l'aide de modèles à paramètres physiques permet d'éviter des simplifications à contre nature.

2. Modélisation physique vectorielle

2.1 Préambule

Les travaux de recherche exposés dans ce mémoire concernent la commande des systèmes électromécaniques. Suivant l'adage qui dit que l'on ne contrôle bien que ce que l'on connaît bien [Hautier99-1], l'élaboration d'un « bon » modèle du système, en vue de la commande, est nécessaire. On entend par « bon modèle » un modèle assez précis pour rendre les services que l'on attend, et assez simple pour être utilisé [Louis04]. Si nous insistons sur la définition de la modélisation c'est que malheureusement, et à tort, beaucoup emploient ce terme alors qu'il s'agit en fait de la représentation d'un modèle et non pas de sa conception.

L'étape de modélisation consiste à sélectionner les variables pertinentes pour la description souhaitée du comportement du système considéré et, à partir de certaines conditions initiales et d'hypothèses, à en établir les relations (mathématiques) qui les lient. Les variables à considérer sont classées de façon générale entre : entrées de commande, entrées de perturbations, grandeurs internes et sorties, voir la Figure 9.

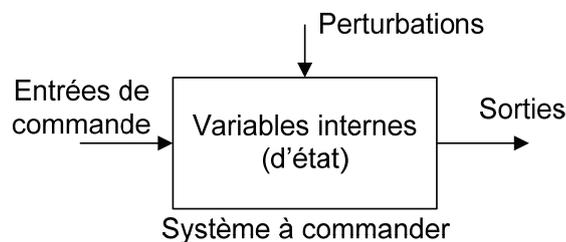


Figure 9 : Synoptique d'un système à commander

Il n'est pas nécessaire de considérer l'ensemble des variables du système (ce qui est a priori impossible) ni de modéliser l'effet de chacune d'entre elles sur les autres. Un modèle est élaboré pour un objectif bien précis et se doit donc d'être utile. Le travail du modélisateur requiert alors une grande expertise de façon à définir une complexité et une précision du modèle, adaptées aux objectifs qui ont été définis au début du projet. Suivant [Louis04] on peut distinguer trois types de modèles en vue de la commande :

- Le modèle de synthèse qui doit permettre la conception des lois de commande facilement implantable. Modèle « simple » mais qui tient compte des phénomènes de réglages et de la poursuite de trajectoire.

- Le modèle d'analyse, destiné à valider les lois de commande par une technique particulière. Plus élaboré que le précédent, il tient en général compte des non-linéarités, des variations paramétriques, des dynamiques négligées...

- Le modèle de simulation qui se doit d'être le plus complet possible et ne se trouve limité que par les contraintes de difficultés de mise en œuvre et de temps de calcul.

On notera enfin la tendance actuelle qui, face à la complexité des systèmes à concevoir et piloter, consiste à ne plus élaborer les différents modèles de façon séquentielle mais plutôt à développer les modèles de façon concurrente. L'idée n'est plus de concevoir et de réaliser un prototype puis de voir s'il est « contrôlable », mais de développer les différentes phases du projet avec le maximum de recouvrement de façon à atteindre les niveaux de compétitivité imposés.

Le Tableau 3 présente les différents types de modèles, et leur types opposés, que l'on rencontre couramment dans la littérature.

Les travaux présentés dans ce mémoire sont basés sur des modèles physiques, MIMO, linéaires, à temps invariant, continus et à paramètres localisés. Bien qu'en apparence limités, ces modèles permettent de résoudre la grande majorité des problèmes de conception d'architecture de commande. Si les modèles de synthèse sont pratiquement toujours moyens et linéaires, on montrera pourquoi et comment il devient pourtant de plus en plus important de considérer des modèles instantanés non-linéaires de façon à atteindre les performances maintenant requises dans certaines applications, comme les applications embarquées.

Type de modèle	Type opposé de modèle	Particularité du modèle
Physique (ou de connaissance)	Boîte noire (ou de comportement)	Le modèle possède des paramètres en lien direct avec la physique du système (dimensions, masse, ...).
Mono-Entrée Mono-Sortie (SISO)	Multi-Entrées Multi-Sorties (MIMO)	Le modèle ne possède qu'une entrée et qu'une sortie.
Linéaire	Non-Linéaire	Le système se modélise par un jeu d'équations différentielles à coefficients constants.
Stationnaire	Non stationnaire	Les paramètres du modèle sont constants dans le temps.
Continu	Echantillonné	Les équations sont écrites en temps continu.
Dynamique	Statique	Les grandeurs de sortie sont en retard par rapport aux grandeurs d'entrée.
Moyen	Instantané	Le modèle ne décrit que le comportement des valeurs moyennes (glissantes) des grandeurs.
Paramètres localisés	Paramètres distribués	Les équations sont ordinaires et non aux dérivées partielles.
Entrée-Sortie	Espace d'état	Les équations ne contiennent que les entrées et les sorties du système et non les variables internes (d'état).

Tableau 3 : Différents types de modèles et leurs types opposés

2.2 Processus de modélisation

Les systèmes électromécaniques impliquent des interactions fortes entre deux différents domaines proches de la physique que sont le génie électrique et la mécanique. A l'instar d'une approche signal, privilégiée par l'automatique dite mathématique qui modélise les systèmes comme des processeurs de signaux, une approche physique et pluridisciplinaire dans le processus de modélisation est alors plus intéressante. L'approche énergétique [Paynter61], [Wellstead79] est alors particulièrement adaptée pour répondre à cette demande.

L'approche énergétique consiste à considérer que la dynamique propre des systèmes provient des flux internes d'échanges d'énergie (la Représentation Énergétique Macroscopique qui sera utilisée pour représenter ces modèles met d'ailleurs en évidence ces échanges internes d'énergie). Cette stratégie de modélisation consiste à décomposer le système initial en un ensemble de sous-systèmes simples qui sont interconnectés et échangent de l'énergie. A la différence d'une approche réductionniste, où chaque composant est modélisé sans tenir compte des autres, l'effet des interactions entre sous-systèmes est naturellement pris en compte. On adopte alors une approche systémique dont [Donnardieu03] donne une définition :

« Nouvelle discipline qui regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques, relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste (découpage d'un système complexe en sous-systèmes disjoints), et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structure, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel, ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe. »

L'approche systémique se trouve être d'autant plus fondamentale dans l'étape de modélisation de systèmes à entrées multiples. En effet, comme le dit [Fossard97] :

« Les systèmes multi-entrées multi-sorties ne se réduisent pas à la mise en parallèle de systèmes monoentrée-monosortie mais se caractérisent par des phénomènes de couplage – ou d'interaction – dans la mesure où l'application d'un signal sur une entrée entraîne en général une variation de plusieurs ou de toutes les sorties. De ce fait, un système multientrées-multisorties n'est pas « comme » un système monovarié avec des calculs plus compliqués, mais que c'est quelque chose de totalement différent. »

L'exemple simple, exposé à la Figure 10, illustre l'erreur grossière de modélisation d'un système à entrées multiples lorsqu'est utilisée une approche réductionniste (ou cartésienne) plutôt qu'une approche systémique. On considère un noyau magnétique fermé autour duquel est bobiné deux enroulements identiques. La saturation ainsi que les fuites magnétiques sont négligées. Chaque enroulement possède une inductance propre notée L .

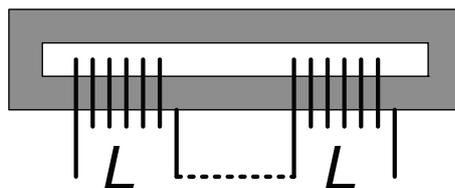


Figure 10 : Exemple de système à modéliser

Le problème consiste à exprimer la valeur de l'inductance équivalente à la mise en série des deux enroulements. L'approche réductionniste consiste à considérer le système multi-entrées (les deux enroulements) comme la somme des deux systèmes mono-entrée, indépendamment de leurs interactions. Dans ce cas, l'inductance équivalente est considérée égale à $L_{eq} = L + L = 2L$.

L'approche systémique insiste sur les notions d'interactions entre éléments d'un système. Ici l'interaction entre les deux enroulements est évidente au spécialiste, s'agissant de l'inductance mutuelle (égale à l'inductance propre en l'absence de fuites). On obtient donc : $L_{eq} = L + M + L + M = 4L$. Cet exemple simple permet de constater qu'il est aisé de raisonner de façon réductionniste et non systémique. Cette erreur, pourtant flagrante, est néanmoins trop souvent commise lors de l'étude des systèmes à entrées multiples.

Une approche énergétique (de fait physique et systémique) évite des erreurs de modélisation et amène à l'élaboration de modèles qui possèdent des paramètres ayant un rapport direct avec les éléments physiques du système considéré (dimensions, masses, ...).

Cette propriété amène plusieurs avantages.

Bien que développés en vue de la commande, ces modèles appelés modèles physiques, permettent un échange plus aisé entre les « concepteurs » et les « automaticiens ». Cet échange est à lier à la notion de la macro-conception ou d'ingénierie concurrente ou enfin de conception système, c'est-à-dire la prise en compte de la future commande d'un produit dès sa phase de conception [Semail09]. De plus, un modèle à paramètres physiques aide d'une part à éviter les erreurs de modélisation et, d'autre part, au réglage des correcteurs équipant le système de contrôle, les performances attendues peuvent aussi être exprimées plus facilement en fonction de la physique du système [Iwasaki12]. **Enfin, la décomposition d'un système complexe non-linéaire en sous-systèmes simples, mais interconnectés, aide à élaborer sa commande [Ortega 01].**

Bien que les variables physiques changent en fonction de la nature du système à modéliser, des similitudes fondamentales existent. Si l'on considère qu'un système physique est un « manipulateur d'énergie », agissant alors sur une paire de variables dont le produit est homogène à une puissance, le travail de modélisation consiste à identifier les variables énergétiques du système et à établir les relations les liant. Considérant les systèmes électromécaniques, deux types de variables peuvent être distingués : les variables potentielles et celles cinétiques selon la forme de l'énergie qu'elles représentent respectivement (voir le Tableau 4). Les éléments composant un système sont alors considérés comme de génération, d'accumulation, de transformation ou de dissipation d'énergie .

Système	Variable potentielle	Variable cinétique
Electrique	Tension	Courant
Mécanique	Force ou couple	Vitesse linéaire ou de rotation

Tableau 4 : Différentes grandeurs potentielles et cinétiques considérées

Les relations entre les grandeurs du système sont issues des lois de la physique (loi d'Ohm, des mailles, des nœuds, principes fondamentaux de la statique et de la dynamique, théorie des poutres, ...) ou lorsque les phénomènes amènent à des modèles trop complexes à des relations mathématiques déduites de l'expérience (la modélisation des frottements en est un exemple classique).

L'approche qui consiste à exprimer les différentes relations entre grandeurs du système impose une analyse fine des interactions entre les différents composants d'un système. Par contre, le niveau de complexité du système peut rendre très rapidement cette approche délicate à mettre en œuvre.

L'approche énergétique permet d'associer les concepts puissants développés par Lagrange et Hamilton afin d'établir les relations entre les variables (énergétiques) d'un système, aussi complexe soit-il [Ortega01]. Le choix des variables et des contraintes qui existent entre ces variables est une étape très importante dans l'application de la méthode. En effet, à partir d'un choix initial de variables, les contraintes imposées au système (couplage étoile/triangle d'un enroulement, liaison encastrement entre deux pièces,...) peut amener à réduire le nombre de variables initiales et permet de définir la notion de degré de liberté.

Parmi l'ensemble des contraintes possibles, les contraintes holonomes s'expriment sous la forme :

$$f_j(q_1, \dots, q_n, t) = 0, \quad j = 1, \dots, m$$

Où les $q_i, i = 1, \dots, n$ sont les variables initiales choisies pour modéliser le système.

Dans ce cas, les m relations peuvent alors être utilisées pour réduire le nombre de variables à $n - m$ de façon à ne plus avoir besoin d'exprimer les contraintes. On dit alors que le système possède un nombre de degrés de liberté $N = n - m$ et les $n - m$ variables choisies sont appelées variables généralisées. On notera que ces variables ne sont pas uniques.

Toutes les contraintes n'étant pas holonomes, il n'est pas toujours possible de réduire le nombre de variables. Il faut alors obligatoirement travailler avec des variables dépendantes.

Pour un système électromécanique soumis à des contraintes holonomes, les équations de Lagrange mènent aux relations :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = u_i + Q_i - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i}$$

Où les $q_i, i = 1, \dots, N$ sont les variables généralisées, $L(q, \dot{q}, t) = T(q, \dot{q}, t) - V(q, \dot{q}, t)$ est le Lagrangien du système tel que T et V soient les énergies potentielle et cinétique du système, u les entrées de contrôle, Q les perturbations et F une fonction de Raleigh (de la forme $\sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N C_{jn} \dot{q}_j \dot{q}_n$) représentative des pertes du système.

Le Tableau 5 définit les différentes variables suivant les domaines. Parmi les variables généralisées sont définies les coordonnées (ou forces) généralisées et leurs dérivées par rapport au temps, c'est à dire les vitesses (ou moments) généralisées.

Variables généralisées	Génie électrique	Génie mécanique
Coordonnées généralisées	Charges électriques	Déplacements mécaniques
Vitesses généralisées	Courants électriques	Vitesses mécaniques
Forces généralisées	Tensions électriques	Forces mécaniques
Moments généralisés	Flux magnétiques	Moments mécaniques

Tableau 5 : Différentes variables généralisées

Les équations de Lagrange mènent à un ensemble d'équations différentielles du second degré en \dot{q} (qui peuvent être d'ailleurs scindées en équation du premier ordre par la théorie d'Hamilton).

Suivant la première remarque et dans les cas simples des systèmes linéaires à temps invariant, on peut d'ailleurs utiliser les équations établies par [Ginsberg01] qui se basent sur le théorème de

l'énergie/puissance (ou plus simplement « bilan de puissance »). Considérant que tout système (non perturbé) peut s'écrire sous la forme :

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = u$$

et que les énergies cinétique, potentielle et les pertes s'écrivent de façon générale :

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N M_{jn} \dot{q}_j \dot{q}_n, \quad M_{nj} = M_{jn} \quad P_{dis} = \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N C_{jn} \dot{q}_j \dot{q}_n, \quad C_{nj} = C_{jn}$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N K_{jn} q_j q_n, \quad K_{nj} = K_{jn}$$

on identifie alors facilement les paramètres du système considéré.

Notons enfin que cette méthode, basée sur la conservation d'énergie, est depuis bien longtemps et largement utilisée pour exprimer le couple développé par une machine électrique [Lesenne81].

Lorsque le système est continu ou décrit par une équation aux dérivées partielles (continuité des grandeurs spatiales à l'inverse d'un modèle à paramètres localisés), on formule l'hypothèse de la séparation de variables. Si l'on prend le cas des poutres, on fera l'hypothèse que le déplacement de la poutre, en fonction du point considéré de la poutre et du temps, est égal au produit d'une variable spatiale (fonction de forme) et d'une variable temporelle.

On transforme ainsi le modèle continu en un modèle à paramètres localisés de dimension infinie, auquel on tronque en général les modes d'ordres supérieurs suivant le degré de précision souhaité (Méthode dite de Galerkin).

2.3 Pourquoi utiliser un formalisme vectoriel ?

2.3.1 Intérêt du formalisme vectoriel

L'analyse des phénomènes physiques a amené à définir des relations entre les différentes variables qui caractérisent ce phénomène (Loi de Kirchhoff, de Newton, ...). Un moyen d'exprimer une loi de la nature consiste à choisir un repère de coordonnées et à définir une grandeur par ses mesures dans ce repère. La forme mathématique de la relation dépend alors du système de repère choisi. Comparée à l'approche matricielle, impliquant l'utilisation de transformations de variables, l'analyse vectorielle (et tensorielle) permet d'exprimer les lois de la nature, indépendantes du choix

d'un repère de coordonnées, de façon invariante. L'étude d'un système par les vecteurs amène alors à une compréhension plus intime du problème tout en apportant plus d'universalité à l'analyse.

L'analyse vectorielle est un outil autant algébrique que géométrique. Si les approches matricielle et vectorielle sont équivalentes d'un point de vue strictement mathématique, le caractère graphique qu'apporte le vecteur permet d'une part d'illustrer et, d'autre part, de résoudre de façon souvent implicite, voire intuitive, certains problèmes apparaissant complexes lorsqu'ils sont exprimés sous forme matricielle.

La généralisation de l'approche vectorielle par vecteurs d'espace multidimensionnels a été développée par [Semail00] et appliquée à des systèmes polyphasés.

2.3.2 Vecteur d'espace de dimension n

Avant de parler de vecteur, il faut définir un espace vectoriel euclidien et le munir d'une base que l'on choisira orthonormée. On associera alors au système à étudier un espace euclidien dont la dimension correspond au nombre de variables initiales choisies pour modéliser le système. Les vecteurs ainsi générés comporteront uniquement des composantes relatives à la même grandeur physique. En ce sens, le vecteur d'espace est différent du vecteur d'état en automatique, qui est constitué de variables de natures différentes, et du vecteur en mécanique, limité à trois dimensions. On peut alors, et ce de façon indépendante de la base de travail choisie, établir les relations entre les différents vecteurs. Ces applications, lorsqu'elles sont linéaires, sont appelées morphismes. A la notion de morphisme, on ajoutera l'utilisation de produits scalaire, vectoriel et mixte entre vecteurs.

2.3.3 Exemple dans le cas d'un système à 5 dimensions

On associe à un système de dimension 5 un espace vectoriel Euclidien E^5 de dimension 5 ainsi qu'une base orthonormée $B^n = \{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, \vec{x}_3^n, \vec{x}_4^n, \vec{x}_5^n\}$ qu'on qualifie de naturelle du fait que les coordonnées d'un vecteur quelconque \vec{g} dans cette base sont cinq grandeurs mesurables g_k .

$$\vec{g} = g_1 \vec{x}_1^n + g_2 \vec{x}_2^n + g_3 \vec{x}_3^n + g_4 \vec{x}_4^n + g_5 \vec{x}_5^n = \sum_{k=1}^5 g_k \vec{x}_k^n$$

Si une grandeur \vec{h} est liée, de par la nature physique du système, à la grandeur \vec{g} , on définit alors une application linéaire λ (ou morphisme) telle que :

$$\vec{h} = \lambda(\vec{g}) \quad \text{où} \quad [L_s^n] = \text{mat}(\lambda, B^n) = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{15} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{51} & L_{52} & \cdots & L_{55} \end{pmatrix}$$

La relation vectorielle reste vraie quelle que soit la base de travail choisie, elle est représentée par une matrice (5 x 5) dans une base particulière. Il existe par contre une base (dite de découplage) dans laquelle la matrice représentative du morphisme est diagonale. Cette base peut être déterminée par les solutions de l'équation caractéristique $\det(\Lambda[I_5] - [L_s^n]) = 0$.

On a alors dans la base de découplage :

$$[L_s^d] = \text{mat}(\lambda, B^d) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_5 \end{pmatrix}$$

Enfin, si l'on choisit des variables appariées (cinétique et potentielle), leur produit scalaire est homogène à une puissance : $p = \vec{h} \cdot \vec{g}$

Le produit vectoriel ($\vec{a} = \vec{b} \wedge \vec{c}$) est un opérateur très utile mais qui se trouve être limité à des vecteurs de dimension trois. Pour des dimensions plus importantes, on introduit la notion de produit mixte qui correspond en fait au déterminant.

3. Représentation graphique causale et énergétique en vue de la commande

Bon nombre d'outils de représentation graphique des modèles des systèmes ont été développés, chacun avec un objectif particulier, mais tous possédant un même point commun fort : ce sont des outils de représentation qui sont capables de réunir différentes personnes (parfois de communautés scientifiques différentes) autour d'un même langage, utilisable et interprétable par tous. Si l'objectif d'un formalisme graphique est bien sûr d'illustrer, il est important qu'il soit aussi capable d'organiser un modèle en différents sous-systèmes en interaction.

Bien que nous ayons montré dans le paragraphe précédent que les phénomènes physiques, quelle que soit leur nature (électrique, mécanique, thermique,...), peuvent être modélisés autour du même élément fédérateur qu'est l'énergie, chaque communauté a développé ses propres outils de représentation (schémas à masses-ressorts, à résistances-inductances-capacités, à réluctances, ..). Nous nous sommes attachés à ne présenter, dans le paragraphe qui suit, que les outils de représentation multi-disciplinaire ou multi-physique.

3.1 Bilan des outils classiques

Le schéma fonctionnel ou plus communément schéma-bloc est sûrement le plus universel des moyens de représentation des modèles [Graybeal51]. Basé sur une représentation mathématique des phénomènes modélisés, il laisse une très grande liberté dans l'organisation de la représentation et n'a pas vocation à représenter un modèle de façon causale, ni à faire apparaître les flux et réservoirs d'énergie, ainsi que les interactions qui y existe.

Le graphe de fluence (ou de Mason) a été développé au MIT dans les années 50 de façon à représenter graphiquement les relations de cause à effet entre les variables d'un système. Si seul cet outil ne semble pas apporter beaucoup, les règles associées (dites Règles de Mason) sont très intéressantes dans la mesure où elles permettent par une étude graphique des boucles et des chemins causaux de systématiser le calcul des fonctions de transfert [Mason53], [Mason56]. Le graphe de fluence ne fait pas apparaître a priori les flux et réservoirs d'énergies du système modélisé.

Enfin, le Bond Graph, développé lui aussi au MIT mais vers les années 60 par Paynter [Paynter61], représente le modèle d'un système en organisant ses relations de cause à effet tout en associant systématiquement par paire deux variables, une variable potentielle, dite variable généralisée d'effort, et une variable cinétique, dite variable généralisée de flux, dont le produit est homogène à une puissance. Le Bond Graph est un outil puissant d'analyse structurelle d'un modèle : l'application de procédures graphiques (manipulation de la causalité, parcours de chemins sur le bond graph) permet de mettre en évidence des propriétés structurelles du modèle (donc valables sans considérer les valeurs numériques des paramètres) telles que son ordre, sa commandabilité et son observabilité structurelles. Bien que ces analyses soient indispensables à l'élaboration d'un système performant de commande et qu'il existe des liens entre une représentation Bond Graph et les représentations d'état et algébrique, le Bond-Graph n'a pas été conçu originellement pour une aide à la déduction d'une architecture de commande. Notons néanmoins que des travaux sont en cours dans cette voie en développant les notions de bicausalité (modèle inverse) pour calculer des lois de commande [Sanchez10].

Si d'autres outils de représentation et d'analyse existent (Power flow Diagram, Power Oriented Graph, Puzzles énergétiques, ...), ils n'ont pas été conçus à l'origine pour aider à la conception de la structure du système de commande. Une étude comparative incluant la plupart de ces formalismes est proposée dans [Bouscayrol05] et reprise dans [Lhomme 07].

3.2 Particularité des formalismes GIC et REM

Le Graphe Informationnel Causal (GIC) et la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) sont des formalismes de représentation des modèles des systèmes électromécaniques tous deux issus des travaux impliquant les membres du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP).

Le Graphe Informationnel Causal (GIC) [Hautier96], [Hautier99-2] permet d'organiser de manière causale les variables énergétiques d'un assemblage d'objets dont on possède la connaissance fonctionnelle. Chaque objet peut avoir une fonction de dissipation, d'accumulation, de transformation ou de conversion. Les entrées et sorties de chaque objet sont définies, d'une part en fonction de sa propre causalité (causalité interne) et, d'autre part, en fonction du contexte de causalité fixé par les objets environnants auxquels il est associé (causalité externe). Grâce au strict respect de la causalité intégrale, propre à tout système physique, le GIC constitue une méthode simple et systématique de description des systèmes, permettant de localiser les éléments accumulateurs, en vue de l'élaboration de leur commande.

A notre sens, la représentation GIC du modèle d'un système amène deux avantages spécifiques, tous deux liés à la particularité de pouvoir, par une méthode graphique, inverser la représentation du modèle :

- De façon directe, pour déduire une architecture de commande en boucle ouverte (feedforward) [Barre04]. La structure ainsi obtenue est, bien qu'il faudrait le démontrer de façon formelle, celle qu'apporterait la théorie des systèmes plats.
- De façon indirecte, pour déduire une architecture de commande du système en boucle fermée (feedback) [Hautier99-2]. La structure de commande ainsi obtenue est à boucles imbriquées, solution industrielle éprouvée qui offre une gestion locale des grandeurs d'état, nécessaire pour éviter que le système ne dépasse ses propres limites.

Néanmoins, l'absence du respect de définition des variables par paire dont le produit est homogène à une puissance, tel que le propose le Bond Graph, peut amener à des représentations trop mathématiques des systèmes, objectif inverse à celui de départ.

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Boucscayrol00], [Boucscayrol03] généralise le GIC, en imposant une représentation à causalité intégrale exclusive, et fait apparaître les variables par paires comme pour le Bond Graph. On notera qu'à l'inverse du Bond Graph, qui est un outil de représentation structurelle, la REM est un outil de représentation fonctionnelle. Enfin, comme son nom l'indique, cette représentation énergétique se veut macroscopique car elle ne représente que les éléments d'accumulation et de distribution d'énergie ainsi que de transfert de puissance, seuls utiles, suivant les règles du GIC, à la déduction des architectures de commande.

Notons que le nombre croissant d'utilisateurs de la REM, d'écoles d'été et de travaux de GdR qui lui ont été et lui sont consacrés, ainsi que les d'universités ou d'écoles qui l'enseignent ne sont que des preuves irréfutables des apports de ce formalisme par rapport aux outils déjà existants, s'agissant de déduire une structure de commande d'un système électromécanique multi-machine multi-convertisseur ou multi-physique (<http://emr.univ-lille1.fr/>).

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM), issue des travaux consacrés au Graphe Informationnel Causal (GIC), permet d'organiser un modèle vectoriel de façon systémique (prise en compte des interactions entre sous-systèmes), fonctionnelle (concaténation des variables d'état non-indépendantes) et causale (causalité physique ou intégrale). Elle est donc à notre sens parfaitement adaptée à la déduction de structures de commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples.

4. Conclusion

La multiplication de sous-systèmes électromécaniques identiques décentralisés, mais couplés (énergétiquement), et constituant ainsi un système électromécanique à entrées multiples, possède des avantages qui permettent de la considérer comme une alternative intéressante aux systèmes centraux de plus forte puissance.

Une revue des méthodes de modélisation et de commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples a été réalisée par le biais de deux groupes applicatifs distincts que sont les ensembles électriques polyphasés et les robots de type gantry bi-actionnés. Cette étude montre, à notre sens, qu'il n'existe pas de méthode systématique pour l'analyse et la déduction de structure de commande de tels systèmes.

Notre analyse a montré qu'une modélisation physique, basée sur les énergies en jeu dans le système, permettait d'éviter une approche réductionniste où chaque composant est modélisé sans tenir compte des autres. L'effet des interactions entre les sous-systèmes internes est modélisé de façon naturelle et permet d'adopter une approche systémique.

Le recours à l'analyse vectorielle permet d'exprimer les lois de la nature, indépendantes du choix du système de coordonnées, de façon invariante. L'étude d'un système par les vecteurs amène alors à une compréhension plus intime du problème tout en apportant plus de simplicité et d'universalité à l'analyse. A la fois rigoureux et permettant tout de même de résoudre de façon implicite, voire intuitive, certains problèmes qui peuvent paraître bien complexes lorsqu'ils sont exprimés sous forme d'un ensemble d'équations, le formalisme vectoriel nous est apparu alors particulièrement adapté à la modélisation des systèmes électromécaniques à entrées multiples.

Enfin, les outils de représentation développés au L2EP par l'équipe « Commande », tels que le GIC et la REM, permettent d'organiser le modèle vectoriel de façon à pouvoir en déduire des architectures de commande tant en boucle ouverte que fermée. On assure alors la gestion locale des grandeurs d'état représentant l'énergie mise en jeu dans le système. Notons que les solutions « boucle ouverte » permettent d'obtenir des dynamiques importantes dans le cas de trajectoires planifiées.

La partie « *Contributions à la modélisation et à la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples* » de ce mémoire montre les résultats obtenus durant ces dernières années en appliquant ainsi les outils présentés.

Troisième partie

Contributions à la modélisation et à la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées

Ayant fait le choix de la modélisation physique vectorielle et de la Représentation Energétique Macroscopique (REM), nous montrons dans ce chapitre comment nous avons contribué à la modélisation et la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées.

Nous présentons un résumé des méthodes originales que nous avons développées et des résultats qu'elles ont permis d'obtenir. Ces méthodes et résultats sont le fruit de travaux de thèses co-encadrées, de rédaction d'articles scientifiques et de chapitres d'ouvrages et de communications diverses.

1. Le contexte local

La deuxième partie de ce mémoire, dédiée à la présentation du contexte et des travaux de recherche accomplis jusqu'alors par la communauté scientifique, ne faisait pas, de façon délibérée, mention des travaux réalisés au sein de l'équipe de recherche constituée par différents acteurs du L2EP, en grande partie membres de l'équipe « Commande ». Avant d'exposer ces travaux, il nous semble important de préciser ceux qui ont contribué aux résultats que nous avons obtenus.

Les travaux décrits dans ce mémoire ont été influencés directement par le contexte local de recherche et particulièrement par trois thèmes : les formalismes de représentation et de commande appliqués aux Systèmes électromécaniques Multimachines Multiconvertisseurs, la généralisation de la méthode des vecteurs d'espace comme outil et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés, enfin les formalismes pour la commande des entraînements à dynamique élevée. Les paragraphes suivants font un bref résumé de ces trois thèmes qui doit surtout permettre de situer temporellement les travaux exposés dans ce mémoire par rapport aux activités de l'équipe « Commande » du L2EP.

1.1 Formalisme pour la commande des Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM) [Boucscayrol03]

Le formalisme « Représentation Énergétique Macroscopique » (REM) est né de la fusion de deux formalismes, les macro-modèles [Boucscayrol00], destinés à la structuration de la commande des systèmes monomachines monoconvertisseurs, dont la notion centrale est la différenciation entre éléments accumulateurs ou non d'énergie, et la représentation SMM [SMM00], développée dans le cadre du projet du GdR SDSE, qui permet de caractériser les répartitions d'énergie au sein des Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs. La REM est à considérer comme le prolongement naturel des travaux de l'équipe « Commande » du L2EP dont l'élément fédérateur, le Graphe Informationnel Causal, peut être considéré comme le premier formalisme permettant une structuration de la commande par inversion du modèle du système (retenu causal) à commander [Hautier96].

Une Structure Maximale de Commande (SMC) se déduit aisément de la REM à l'aide de règles d'inversion. La structure de commande ainsi obtenue permet une gestion optimisée de l'énergie au plus près des éléments qui la transforment.

De nombreux travaux et thèses ont été consacrés au formalisme REM. On trouvera une liste non-exhaustive sur le site qui lui est dédié (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/references.html>).

1.2 Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace aux systèmes polyphasés [Semail00] [Semail09]

La théorie des vecteurs d'espace, généralisée aux systèmes électriques polyphasés, a été développée dans les travaux de thèses et d'Habilitation à Diriger des Recherches d'Eric Semail [Semail00], [Semail09]. Mes propres travaux de thèse [Kestelyn03], s'ils devaient être résumés en quelques mots, sont une suite logique de ceux d'Eric Semail, auxquels a été ajoutée le concept novateur d'équivalence, à savoir un ensemble polyphasé est considéré comme la somme des effets de systèmes fictifs multimachines, notion héritée du formalisme SMM. Ce concept, s'il facilite la communication par rapport à l'outil vectoriel, permet de déduire de façon graphique des structures de commande souvent obtenues ailleurs de façon plus intuitive.

L'association « Formalisme Vectoriel » et « REM », bien que née de l'étude des systèmes polyphasés, a orientée mon analyse des systèmes mécaniques multi-actionnés sous cet angle.

1.3 Formalisme pour la commande des entraînements à dynamique élevée [Barre04]

Ce thème, initiée au sein de l'équipe « Commande » du L2EP avec la thèse de Pierre-Jean Barre en 1995, a été particulièrement développée entre 2002 et 2006 par les travaux menés dans le cadre de l'Equipe de Recherche Technologique CEMODYNE (ERTint 1022 : Commande et Entraînement de Machines-Outils à DYNamique Elevée » à laquelle je fus intégré dès mon arrivée à l'ENSAM en 2004.

La thématique générale concerne la problématique rencontrée lors de l'utilisation de systèmes de positionnement industriels à grande cadence. La dynamique élevée de ces dispositifs est obtenue par l'allègement des structures mobiles (diminution des inerties) et l'augmentation des efforts imposés. Dans ces conditions, l'hypothèse classique de modélisation des structures par des modèles

rigides n'est plus valable et il est nécessaire de prendre en compte les flexibilités structurelles des dispositifs.

Dans l'ensemble des travaux antérieurs à ceux exposés dans cette partie du mémoire, le Graphe Informationnel Causal (GIC) est utilisé comme outil graphique de représentation des modèles. A partir de règles d'inversion de la représentation GIC, des solutions pour la commande, classiques ou particulières, sont retrouvées formellement.

Les travaux exposés dans ce mémoire sont une extension des travaux développés pour la commande des entraînements à dynamique élevée aux systèmes multi-actionnés, configurés en gantry, seuls des systèmes mono-actionnés ayant été auparavant les sujets des études menées.

2. Contributions

Les différentes contributions à la modélisation et la commande des systèmes électromagnétiques sont exposés dans les paragraphes suivants. Bien que résultat de multiples échanges et d'études que j'ai pu encadrer, mes travaux ont pour la plupart été formalisées lors des thèses que j'ai ou je co-encadre, à savoir :

- **[TH1]** : La thèse de Julien Gomand intitulée « *Analyse de systèmes multi-actionnés parallèles par une approche graphique causale. Application à un processus électromagnétique de positionnement rapide* » démarrée en septembre 2005 et soutenue le 04 décembre 2008. J'ai participé à l'encadrement de la thèse à hauteur de 50%.
Y sont associées les publications : [BR1] [RI7] [RI5] [CI19] [CI18] [CI17] [CN4].
- **[TH2]** : La thèse d' Yvan Crévits intitulée « *Commande auto-adaptative de machines synchrones polyphasées en mode dégradé* », démarrée en septembre 2005 et soutenue le 12 juillet 2010. J'ai participé à l'encadrement de la thèse à hauteur de 75%.
Y sont associées les publications : [RI9] [CI26] [CI24] [CI22] [CI20] [CI15]
- **[TH3]** : La thèse d' Ivan Garcia-Herreros intitulée « *Modélisation et commande d'un système multi-actionnés parallèle de grande dimension* », démarrée en décembre 2008 et soutenue le 23 mai 2012. J'ai participé à l'encadrement de la thèse à hauteur de 75%.
Y sont associées les publications : [CI25] [CI23] [DIV5]
- **[TH4]** : la thèse de Li Lu intitulée « *Commande de Machines Polyphasées à Aimants Permanents Réductantes pour la Réalisation d'une Fonctionnalité MILD Hybride* », démarrée en octobre 2009 et dont la soutenance est prévue en juin 2013. J'ai participé à l'encadrement de la thèse à hauteur de 50%.
Y sont associées les publications [CI32] [CI31] [CN1]
- **[TH5]** : La thèse de Paul Sandulescu intitulée « *Modélisation et commande de machines à trois phases indépendantes pour intégration dans un système de traction/chargeur de batterie*», démarrée en janvier 2010 et dont la soutenance est prévue en février 2013. J'ai participé à l'encadrement de la thèse à hauteur de 50%.
Y sont associées les publications : [CI32] [CI33] [CI34] [CI30] [CI28].

J'ai choisi de classer nos contributions suivants des thèmes déjà abordés lors de la deuxième partie de ce mémoire, dédiée au contexte et aux études menées par d'autres équipes de recherche,

à savoir : nos contributions à la modélisation, à l'enrichissement des formalismes GIC et REM et à la commande.

Dans les thèmes dédiés à la modélisation et à la commande, nous n'exposons que les résultats marquants issus de systèmes polyphasés ou de systèmes gantry bi-actionnés. En effet, pour chacun d'eux sont mentionnées des références (thèses, publications, actes d'école d'été, ..) qui permettent d'avoir le détail des méthodes brièvement exposées dans ce mémoire.

2.1 Contributions à la modélisation des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées

2.1.1 Modélisation des ensembles polyphasés

L'origine et le détail de la modélisation des ensembles polyphasés fait l'objet des thèses de doctorat d'Eric Semail [Semail00] et de Xavier Kestelyn [Kestelyn03] (Reproduite dans [OS2]) qui ont été résumées dans les chapitres des ouvrages [OS1] et [OS3] à [OS5]. Dédiées à la machine synchrone, ces premiers travaux ont été complétés par la prise en compte, simplifiée, des effets de saillance et de saturation magnétique dans [Bruyère09] et dans [TH5].

Le processus de modélisation vectorielle d'un ensemble n-phasé commence par l'association d'un espace euclidien E^n de dimension n muni d'une base orthonormée dite naturelle $B^n = \{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, \dots, \vec{x}_n^n\}$.

Dans cette base, on définit des vecteurs :

- tension : $\vec{v} = v_1 \vec{x}_1^n + v_2 \vec{x}_2^n + \dots + v_n \vec{x}_n^n$
- courant : $\vec{i} = i_1 \vec{x}_1^n + i_2 \vec{x}_2^n + \dots + i_n \vec{x}_n^n$
- flux : $\vec{\phi} = \phi_1 \vec{x}_1^n + \phi_2 \vec{x}_2^n + \dots + \phi_n \vec{x}_n^n$

Pour une machine synchrone à pôles lisses et en faisant l'hypothèse de linéarité magnétique, on déduit une seule équation vectorielle en tension qui regroupe les équations en tension scalaire de chaque phase de la machine :

$$\vec{v} = R_s \vec{i} + \lambda \left(\left(\frac{d\vec{i}}{dt} \right)_{/B^n} \right) + \vec{e} \quad (3.1)$$

Dans laquelle :

– λ est une application linéaire (ou morphisme) liant les courants statoriques et les composantes du flux statorique, telle que $\lambda(\vec{i}) = \vec{\phi}_{ss}$. Cette application s'écrit communément dans la base naturelle B^n sous la forme d'une matrice symétrique et circulante, si on retient l'hypothèse de régularité constructive qui induit que toutes les phases sont identiques.

$$[L_s^n] = \text{mat}(\lambda, B^n) = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

– $\vec{e} = \left(\frac{d\vec{\phi}_{sr}}{dt} \right)_{/B^n} = \Omega \cdot \vec{\varepsilon}(\theta)$ est le vecteur forces électromotrices qui, dépendant des composantes

de flux statorique dues au rotor, s'écrit sous la forme d'une fonction de forme $\vec{\varepsilon}$ dépendante de la position relative du rotor par rapport aux enroulements statoriques et de la vitesse Ω du rotor.

Les différentes valeurs du vecteur tension machine \vec{v} résultent des combinaisons des états des bras de l'onduleur de tension (2^n dans le cas d'un onduleur à n bras comme le montre la Figure 11) mais aussi du couplage (étoile en général) entre les phases de la machine.

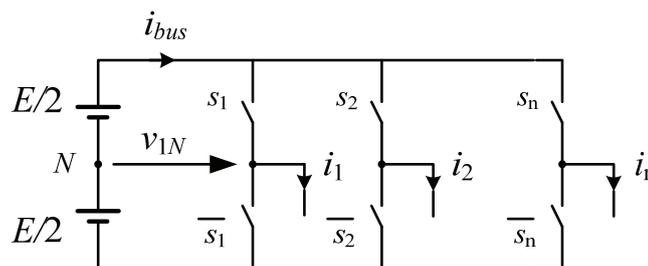


Figure 11 : Onduleur de tension n-phasé à n bras

En présence d'un couplage, étoile par exemple, il est aisé d'obtenir les tensions machine en ôtant aux tensions onduleur leur composante homopolaire. D'un point de vue du formalisme vectoriel, le vecteur tension machine est alors obtenu par projection du vecteur tension issu de l'onduleur (qui se

représente dans la base naturelle par $\vec{v}_N = v_{1N}\vec{x}_1^n + v_{2N}\vec{x}_2^n + \dots + v_{nN}\vec{x}_n^n = \sum_{k=1}^n v_{kN}\vec{x}_k^n$ dans le sous-espace de dimension $(n-1)$ associé à la machine couplée en étoile. L'alimentation par l'onduleur connecté à la machine couplée en étoile forme donc un morphisme d'alimentation :

$$\vec{v} = A(\vec{v}_N) \quad (3.3)$$

Avec

$$[T_{uv}^n] = \text{mat}(A, B^n) = \begin{pmatrix} \frac{n-1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ \frac{1}{n} & \frac{n-1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & \frac{n-1}{n} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

La modélisation vectorielle montre que, contrairement au formalisme matriciel, un ensemble onduleur-machine polyphasé est modélisé de façon unifiée et unique, quelle que soit la base de représentation². Enfin, les sous-systèmes peuvent être modélisés isolément sans a priori sur leurs futures interconnexions, interconnexions qui sont modélisées ultérieurement par des morphismes (relations linéaires) entre les espaces associés à chacun des sous-systèmes.

La puissance instantanée transitant dans la machine est obtenue par simple produit scalaire entre les vecteurs tension et courant :

$$p = \vec{v} \cdot \vec{i} = \sum_{k=1}^n v_k i_k \quad \text{ou en remplaçant par (3.1)} \quad p = R_s(\vec{i})^2 + \lambda \left(\left(\frac{d\vec{i}}{dt} \right)_{/B^n} \right) \cdot \vec{i} + \vec{e} \cdot \vec{i}$$

On reconnaîtra, dans le cadre d'hypothèses nécessaires :

– $p_j = R_s(\vec{i})^2$, les pertes Joule statoriques;

² A condition que le passage d'une base à une autre soit linéaire. Le cas où existe une rotation entre deux bases introduit des termes supplémentaires. On rappelle la formule de la dérivation composée (ou formule de Bour)

$$\left(\frac{d\vec{X}}{dt} \right)_{/B^2} = \left(\frac{d\vec{X}}{dt} \right)_{/B^1} + (\vec{\Omega}_{1/2} \wedge \vec{X})$$

avec $\Omega_{1/2}$ la vitesse de rotation instantanée de la base B^1 par rapport à la base B^2 . Pour éviter des erreurs, on indique alors systématiquement la base dans laquelle est effectuée la dérivation.

– $p_{mag} = \left(\lambda \left(\frac{d\vec{i}}{dt} \right) \right)_{/B^n} \cdot \vec{i}$, la puissance liée à l'énergie magnétique stockée dans la machine;

– $p_{em} = \vec{e} \cdot \vec{i}$, la puissance électromécanique développée par la machine qui est à l'origine de la

création du couple électromagnétique $c = \frac{p_{em}}{\Omega} = \frac{\vec{e} \cdot \vec{i}}{\Omega} = \vec{\varepsilon} \cdot \vec{i}$

Ces relations peuvent être d'une part illustrées et, d'autre part, organisées de façon causale par la Représentation Énergétique Macroscopique présentée à la Figure 12. Sur cette représentation, chaque chiffre de couleur violette correspond à la dimension du vecteur.

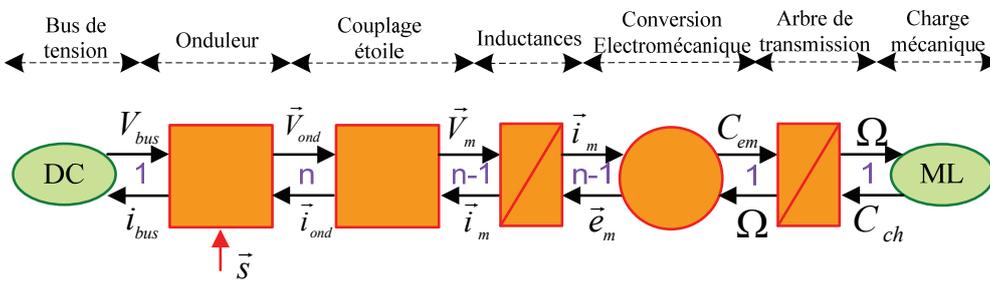


Figure 12 : Représentation Énergétique Macroscopique d'un ensemble onduleur-machine synchrone polyphasé

A la Figure 12, l'onduleur est commandé par le vecteur des fonctions de connexion des bras \vec{s} . Si on ne peut représenter de façon graphique l'ensemble des combinaisons de ce vecteur dans un espace à n dimensions, la Figure 13 montre la représentation des différentes combinaisons du vecteur tension onduleur dans le cas d'une machine triphasée. Sont indiquées sur la Figure 13 la base naturelle $B^n = \{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, \vec{x}_3^n\}$ et une base $B^d = \{\vec{x}_\alpha^d, \vec{x}_\beta^d, \vec{x}_h^d\}$ dans laquelle les projections sur un plan engendré par $\{\vec{x}_\alpha^d, \vec{x}_\beta^d\}$ du vecteur tension onduleur \vec{v}_N correspondent au vecteur tension machine \vec{v} . Les différentes valeurs de \vec{v} , vecteur tension associé à une machine triphasée couplée en étoile, forme un hexagone, classiquement introduit lors de la commande par vecteur d'espace.

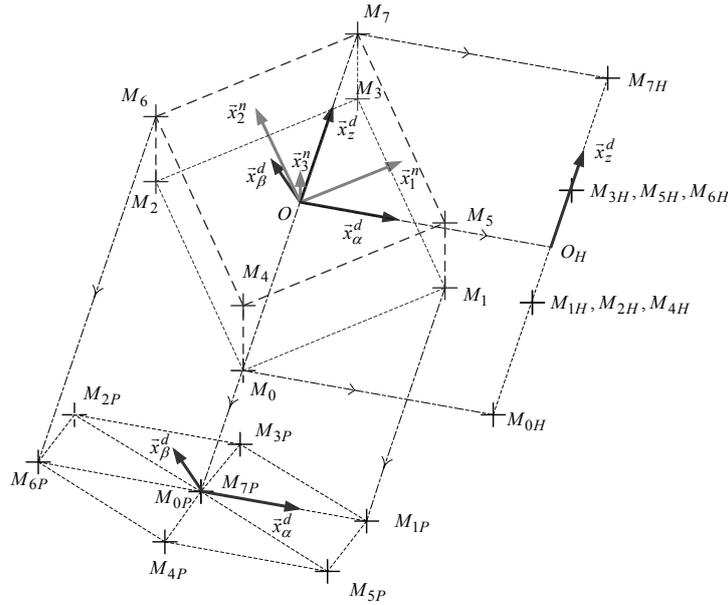


Figure 13 : Représentation vectorielle des tensions issues d'un onduleur à trois bras

A la modélisation vectorielle d'un ensemble onduleur-machine polyphasé peuvent être associées des représentations graphiques, autant du système par la REM de façon à en déduire une architecture de commande, que de l'onduleur pour en déduire des stratégies de commande des interrupteurs.

Si le modèle vectoriel est valable quelle que soit la base de représentation, il est intéressant de déterminer une base dans laquelle le morphisme λ est caractérisé par une matrice diagonale, base où existe un découplage magnétique. Une telle base est constituée par les vecteurs propres \vec{x}_k^d du morphisme associés aux valeurs propres Λ_k de λ , solutions de l'équation caractéristique : $\det(\Lambda [I_n] - [L_s^n]) = 0$. Le calcul détaillé de ces valeurs propres et des vecteurs propres associés peut être trouvé dans [Semail00].

Dans la base de découplage $B^d = \{\vec{x}_1^d, \vec{x}_2^d, \dots, \vec{x}_n^d\}$, la matrice caractéristique $[L_s^d]$ du morphisme λ est exprimée par :

$$[L_s^d] = \text{mat}(\lambda, B^d) = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Lambda_n \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Du fait de la circularité de la matrice des inductances, les valeurs propres sont en général doubles, c'est-à-dire qu'on peut leur associer deux vecteurs propres indépendants. Dans le cas d'un nombre de phases n impair, seule une des valeurs propres est simple (i.e. associée à un seul vecteur propre), et deux le sont dans le cas d'un nombre de phases n pair.

L'espace vectoriel de départ peut donc être décomposé en une somme de sous-espaces orthogonaux vectoriels de dimension 2 ou 1, chacun associé à une valeur propre double ou simple. Chaque vecteur peut donc être décomposé dans les sous-espaces propres caractéristiques. Ce qui donne pour le vecteur tension de la machine :

$$\vec{v} = \sum_{m=1}^N \vec{v}_k^d = \sum_{m=1}^N \left(R_s \cdot \vec{i}_m^d + \Lambda_m \cdot \left(\frac{d\vec{i}_m^d}{dt} \right) \right)_{/B^d} + \vec{e}_m^d \quad (3.6)$$

Ainsi que pour l'expression de la puissance instantanée :

$$\begin{aligned} p = \vec{v} \cdot \vec{i} &= \left(\sum_{m=1}^N \vec{v}_k^d \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^N \vec{i}_k^d \right) = \sum_{m=1}^N \left(\vec{v}_k^d \cdot \vec{i}_k^d \right) \\ &= \sum_{m=1}^N \left(R_s \left(\vec{i}_m^d \right)^2 + \Lambda_k \cdot \left(\frac{d\vec{i}_m^d}{dt} \right) \cdot \vec{i}_m^d + \vec{e}_m^d \cdot \vec{i}_m^d \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Il apparaît, d'après (3.7) que l'énergie mécanique totale de la machine est la somme de N énergies mécaniques associées chacune à un sous-espace. Il est donc possible de considérer que le couple fourni par la machine réelle est égal à la somme des couples fournis par N machines fictives. Chacune de ces machines est caractérisée par sa résistance R_s , son inductance Λ_k et son vecteur force électromotrice \vec{e}_m^d . Selon la dimension de l'espace propre auquel elle est associée, la machine fictive sera soit monophasée, soit diphasée. Ces machines tournent toutes à la même vitesse. Elles peuvent donc être considérées comme mécaniquement accouplées comme l'illustre la Figure 14.

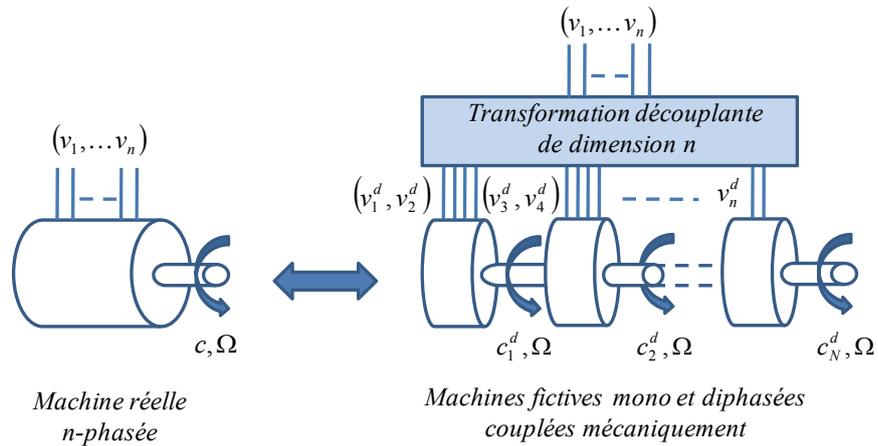


Figure 14 : Equivalence entre une machine n-phasée et un ensemble de machines fictives mono et diphasées couplées mécaniquement

Il n'existe qu'une seule et unique décomposition d'une machine n-phasée en machines fictives. Cette unicité mise en évidence constitue un point fort de l'approche vectorielle par rapport aux approches matricielles, utilisant des transformations dont le nombre est théoriquement infini.

Les machines fictives sont alimentées par des vecteurs tension obtenus par projections des tensions onduleur dans les différents sous-espaces caractéristiques. En instantané, les tensions alimentant les machines fictives ne sont pas indépendantes. Par contre, aux valeurs moyennes, la tension onduleur devient $\langle \vec{v}_N \rangle (qT_e) = \sum_{m=1}^N \langle \vec{v}_{N_m}^d \rangle (qT_e)$ et alors chaque machine est alimentée de façon indépendante aux valeurs moyennes. On peut alors introduire la notion d'onduleurs fictifs.

La Figure 15 montre la REM d'un ensemble convertisseur-machine polyphasé aux valeurs moyennes représenté par une somme de systèmes fictifs (onduleur + machine). Chaque machine fictive est indiquée $a, b, c, \dots, k, \dots, N-1$. Le couplage étoile sans neutre sorti se représente alors par l'impossibilité d'alimenter la machine fictive homopolaire, dont les grandeurs sont indicées z .

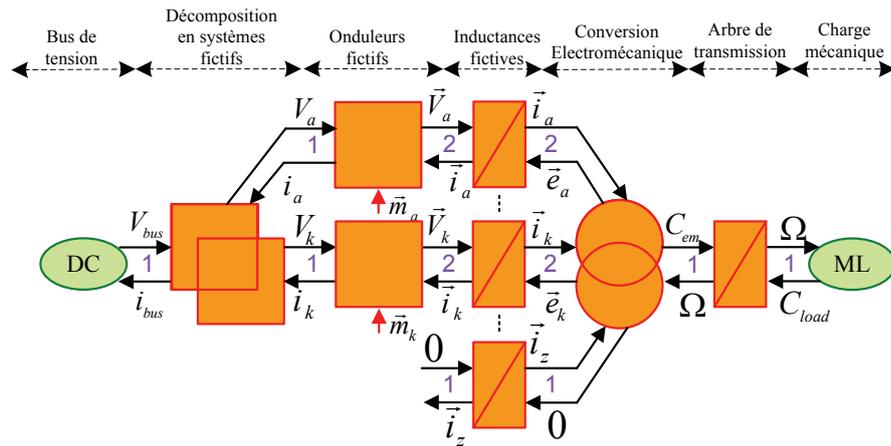


Figure 15 : Représentation REM d'un ensemble convertisseur-machine n-phasé aux valeurs moyennes en une somme de sous-systèmes fictifs

Chaque machine fictive possède ses caractéristiques propres qu'il convient de connaître afin de bien la concevoir et la commander.

En régime permanent périodique, les grandeurs associées à une machine fictive font partie d'un groupe harmonique des grandeurs de la machine réelle.

Cet aspect est fondamental pour élaborer la commande de la machine ou lors de sa phase de conception, particulièrement dans le cas de machines tolérantes aux fautes. On qualifie de « principale » la machine fictive associée au premier harmonique, « secondaire » celle associée à l'harmonique 2, « tertiaire » celle associée à l'harmonique 3, ..., et enfin « homopolaire » celle associée à l'harmonique n . Le Tableau 6 résume les groupes harmoniques associés aux machines polyphasées à 3, 5 et 7 phases.

	Machine Triphasée	Machine Pentaphasée	Machine Heptaphasée
Machine principale	$h=1, 2, 4, 5, 7, \dots$	$h=1, 4, 6, 9, 11, \dots$	$h=1, 6, 8, 13, 15, \dots$
Machine secondaire	Inexistant	$h=2, 3, 7, 8, 12, \dots$	$h=2, 5, 9, 12, 16, \dots$
Machine tertiaire	Inexistant	Inexistant	$h=3, 4, 10, 11, 17, \dots$
Machine homopolaire	$h=0, 3, 6, 9, \dots$	$h=0, 5, 10, 15, \dots$	$h=0, 7, 14, 21, \dots$

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des groupes harmoniques associés aux machines polyphasées à 3, 5 et 7 phases

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème exclusif de la modélisation des ensembles polyphasés, en rappelant les points forts dont ils traitent :

- [DIV1], [CN1], [CI1] détaillent le processus de modélisation vectorielle des ensembles polyphasés et exposent le concept Multimachines Multiconvertisseurs.
- [DIV3], [CN2], [CI2], [CI3] détaillent les effets des harmoniques sur la conception de la machine et sur sa commande.

2.1.2 Modélisation des ensembles polyphasés en mode dégradé d'alimentation

La modélisation des ensembles polyphasés en mode dégradé d'alimentation a été abordée particulièrement dans la thèse [TH2] (ou [Crévits10]). Par rapport aux techniques classiques qui consistent à changer le modèle de l'ensemble lors d'un défaut d'alimentation, nous avons pris le parti de développer un modèle à topologie invariante, valable en mode normal comme en mode dégradé d'alimentation. Ce modèle devant permettre à la fois l'analyse, la simulation et la déduction d'architectures de commande, sa représentation par le biais de la REM doit être réalisable.

En supposant que le défaut d'alimentation est connu et qu'après son isolation son effet soit équivalent à l'ouverture d'une phase statorique, la méthode que nous avons développée consiste à ajouter en série avec chaque phase un dipôle ouvrant qui peut être modélisé par une résistance variable R_{DO} (De valeur nulle si l'alimentation est saine, de valeur très importante si l'alimentation est coupée). Cette technique est illustrée à la Figure 16 dans laquelle v_N est une tension onduleur et v une tension machine.

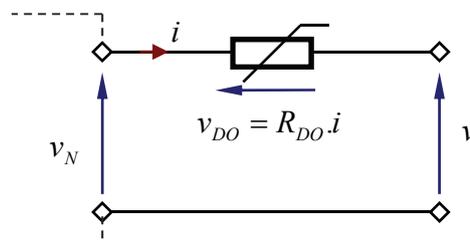


Figure 16 : Concept de dipôle ouvrant

La relation entre les vecteurs tension onduleur \vec{v}_N et machine \vec{v} devient alors : $\vec{v} = \vec{v}_N - \vec{v}_{DO}$

$$\text{avec } \vec{v}_{DO} = \Delta(\vec{i}) \quad \text{où} \quad [R_{DO}^n] = \text{mat}(\Delta, B^n) = \begin{pmatrix} R_{DO1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{DO2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_{DO_n} \end{pmatrix}.$$

La REM de l'ensemble est donnée à la Figure 17 dans laquelle les dipôles ouvrants sont représentés par des sources de tension couplées en série aux enroulements de la machine. Cette représentation permet de simuler l'ensemble sain ou en défaut en ne conservant un seul modèle.

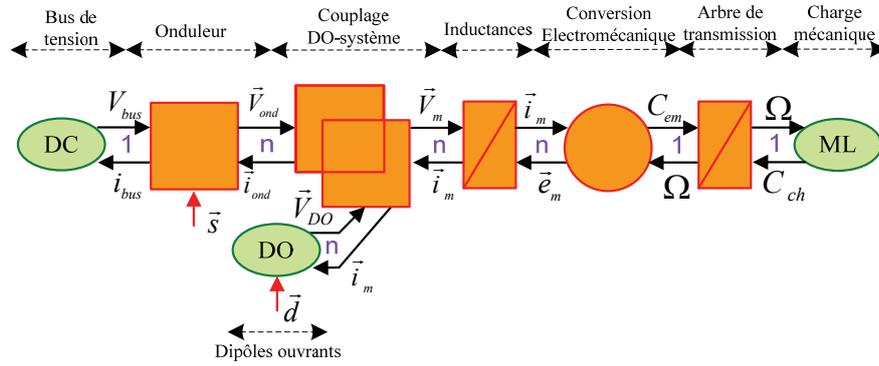


Figure 17 : REM d'un ensemble polyphasé, valable en mode normal comme dégradé

Si l'on écrit les relations dans une base de Park généralisée à n phases (un repère tournant dq et associé à chacune des machines fictives indicée de 0 à N), on obtient alors une matrice des dipôles ouvrants pleine telle que :

$$[R_{DO}^d] = \text{mat}(\Delta, B^d) = \begin{pmatrix} R_{MO} & R_{MO-M1,d} & R_{MO-M1,q} & \dots & R_{MO-MN,d} & R_{MO-MN,q} \\ R_{MO-M1,d} & R_{M1,d} & R_{M1,dq} & \dots & R_{M1-MN,d} & R_{M1-MN,dq} \\ R_{MO-M1,q} & R_{M1,dq} & R_{M1,q} & \dots & R_{M1-MN,dq} & R_{M1-MN,q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ R_{MO-MN,d} & R_{M1-MN,d} & R_{M1-MN,dq} & \dots & R_{MN,d} & R_{MN,dq} \\ R_{MO-MN,q} & R_{M1-MN,dq} & R_{M1-MN,q} & \dots & R_{MN,dq} & R_{MN,q} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Les composantes de la matrice $[R_{DO}^d]$ sont des combinaisons des résistances R_{DO1} à R_{DO_n} et de fonctions trigonométriques (sinus et cosinus) de l'angle θ entre rotor et stator. Le Tableau 7 donne le contenu harmonique des valeurs de la matrice $[R_{DO}^d]$.

		M0	M1		M2		...	Mr-1		Mr	
			d	q	d	q	...	d	q	d	q
M0		0	1	1	5	5	...	h_{r-1}	h_{r-1}	h_r	h_r
M1	d	1	0 et 2	2	4 et 6	4 et 6	...	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm 1$	$h_r \pm 1$	$h_r \pm 1$
	q	1	2	0 et 2	4 et 6	4 et 6	...	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm 1$	$h_r \pm 1$	$h_r \pm 1$
M2	d	5	4 et 6	4 et 6	0 et 10	10	...	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_r \pm h_2$	$h_r \pm h_2$
	q	5	4 et 6	4 et 6	10	0 et 10	...	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_r \pm h_2$	$h_r \pm h_2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Mq-1	d	h_{r-1}	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_{r-1} \pm h_2$	...	$h_{r-1} \pm h_{r-1}$	$2h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$
	q	h_{r-1}	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm 1$	$h_{r-1} \pm h_2$	$h_{r-1} \pm h_2$	...	$2h_{r-1}$	$h_{r-1} \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$
Mq	d	h_r	$h_r \pm 1$	$h_r \pm 1$	$h_r \pm h_2$	$h_r \pm h_2$	...	$h_r \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_r$	$2h_r$
	q	h_r	$h_r \pm 1$	$h_r \pm 1$	$h_r \pm h_2$	$h_r \pm h_2$	...	$h_r \pm h_{r-1}$	$h_r \pm h_{r-1}$	$2h_r$	$h_r \pm h_r$

Tableau 7 : Contenu harmonique des coefficients de la matrice des dipôles ouvrants dans une base de Park généralisée

Le système étant considéré linéaire, les perturbations harmoniques induites par les dipôles ouvrants se retrouvent dans les tensions et les courants lors d'une alimentation dégradée. On détermine alors facilement les harmoniques qui seront présents dans les grandeurs électriques si une ou plusieurs phases sont ouvertes.

En résumé, la stratégie qui consiste à modéliser la connexion entre l'onduleur et la machine par une résistance variable permet de reproduire le comportement de l'ensemble des défauts potentiels d'alimentation (phases ouvertes) à l'aide d'un modèle à topologie invariante. De plus, l'analyse de la matrice des dipôles ouvrants dans la base de Park permet de connaître le contenu harmonique des tensions et courants lorsqu'une ou plusieurs phases sont ouvertes.

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème de la modélisation des ensembles polyphasés en défaut d'alimentation, en rappelant les points forts dont ils traitent.

- [CI15] montre une bonne corrélation entre les résultats de simulation numérique d'une machine à 7 phases en mode dégradé d'alimentation issus de la méthode des dipôles ouvrants et les résultats expérimentaux.
- [CI20], [CI26], [CI24] développent un modèle unique pour élaborer une structure de commande valable autant en mode normal que dégradé.

2.1.3 Modélisation des systèmes gantry bi-actionnés

La modélisation des systèmes gantry bi-actionnés a été développée durant les deux thèses [TH1] (ou [Gomand08]) et [TH3] (ou [Garcia12]), toutes deux en partenariat avec la société suisse ETEL, leader dans la construction de moteurs linéaires et de systèmes de positionnement rapides et précis. Ces travaux ont consisté à développer des modèles physiques et causaux permettant, par inversion causale, de déduire des architectures de commande à la fois originales, efficaces et pouvant être facilement mise en œuvre dans des systèmes industriels.

Les travaux du Julien Gomand ont particulièrement porté sur les liens entre les propriétés « automatiques » d'un système (observabilité, commandabilité, calcul de fonctions entrées-sorties) et le Graphe Informationnel Causal (GIC). Ces liens seront particulièrement explicités dans le paragraphe dédié à la contribution au formalisme.

Une grande partie du travail de thèse consista à modéliser un système en gantry bi-actionné par plusieurs modèles de granularités différentes. L'approche physique, choisie dans la phase de modélisation, montre qu'elle permet de réduire un modèle en évitant les contresens physiques. Les différentes commandes, déduites par inversion causale des modèles représentés par le formalisme GIC, seront de complexité croissante mais auront toujours comme objectif de contrôler les énergies dans le système (de manière alors plus ou moins fine).

La Figure 18 montre différents modèles de granularités différentes d'un robot gantry bi-actionné dont la poutre est considérée comme rigide, tandis que la Figure 19 expose la représentation de deux des modèles par le GIC.

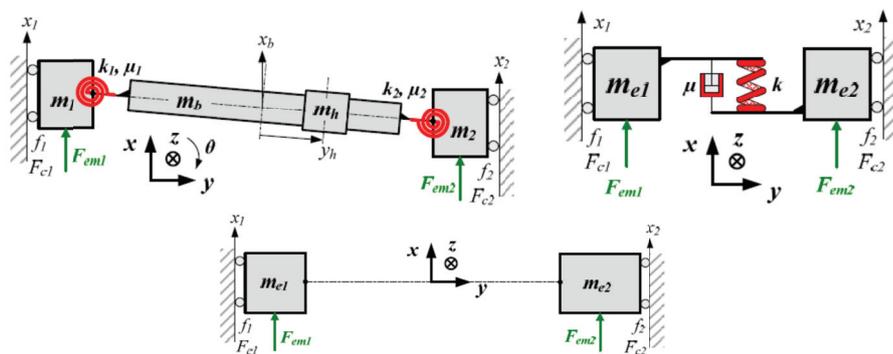


Figure 18 : Différentes granularités de modèle d'un gantry bi-actionné dont la poutre est supposée rigide

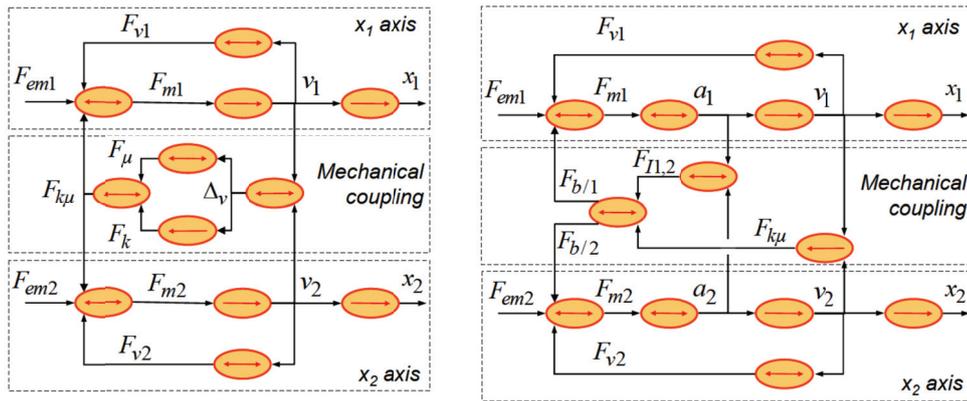


Figure 19 : Représentations GIC de différents modèles de systèmes en gantry bi-actionnés

Les travaux d'Ivan Garcia-Herreros sont une suite logique des travaux de Julien Gomand dans laquelle la poutre transversale, mue et portée par les deux axes parallèles, ne peut plus être considérée comme ayant un comportement rigide. De plus, le comportement du système lors de mouvements de type suivi de trajectoires circulaires impose de prendre en compte la dynamique du mouvement de la tête au long de la poutre, rendant les axes orthogonaux dynamiquement couplés de façon non-linéaire. Il s'agissait alors de vérifier si le formalisme GIC (ou REM) était à même de représenter des systèmes modélisés par des équations aux dérivées partielles (modèles continus par opposition aux modèles à paramètres localisés, modélisés par des équations aux dérivées temporelles ou ordinaires) et dépendant de certains paramètres de façon non-linéaire.

La Figure 20 montre le modèle à paramètres à la fois localisés (par exemple tous les solides supposés indéformables) et distribués (déformation de la poutre modélisée par une fonction continue spatio-temporelle $u(y,t)$).

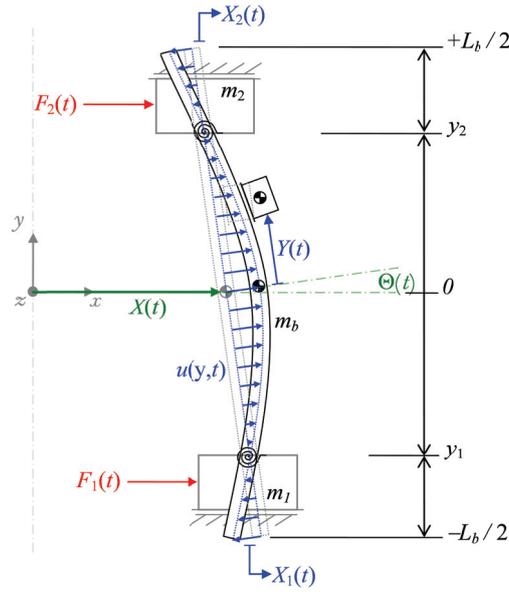


Figure 20 : Modèle à éléments localisés et répartis d'un gantry bi-actionné dont la poutre est supposée flexible

Les problèmes de modélisation avec prise en compte de milieux continus dans un environnement à paramètres localisés ont déjà été abordés par les contributeurs du Bond Graph [Richard08]. Bien que plusieurs méthodes aient été développées, nous avons choisi la méthode des modes finis. Même si cette méthode est a priori réservée aux systèmes linéaires, elle permet d'intégrer facilement la représentation de la poutre dans la représentation du système.

Le champ de déplacement de la poutre est approximée par sa série de Ritz limitée aux nombres de modes N que l'on désire conserver : $u(y,t) \approx u_{Ritz}(y,t) = \sum_{k=1}^N \psi_k(y) q_k(t)$. Où $\psi_k(y)$ appelée fonction de forme du mode k , ne dépend que de l'espace. $q_k(t)$ est une coordonnée généralisée ou modale qui ne dépend que du temps.

Les équations dynamiques du système, déterminées par le formalisme d'Euler-Lagrange, amènent à l'équation classique de la mécanique (3.9) qui permet de représenter un système à M degrés de libertés.

$$M \left(\frac{d^2 \vec{q}(t)}{dt^2} \right)_{/B^n} + H \left(\frac{d\vec{q}(t)}{dt} \right)_{/B^n} + X \left(\frac{d\vec{q}(t)}{dt} \right)_{/B^n} + K(\vec{q}(t)) = \vec{Q}(t) \quad (3.9)$$

Dans cette équation, $\vec{q}(t)$ correspond au vecteur des coordonnées généralisées et $\vec{Q}(t)$ à celui des efforts généralisés, tous deux de dimension n . Les morphismes M , H , X et K modélisent

respectivement les effets inertiels, de Coriolis, d'amortissement et de raideur, tous représentés par des matrices pleines carrées de dimension n dans la base naturelle $B^n = \{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, \dots, \vec{x}_n^n\}$.

Le modèle vectoriel du gantry peut être représenté sous forme de Graphe Informationnel Causal dans la base naturelle sans difficultés particulières. Néanmoins, car de taille très importante, il est nécessaire de représenter ce modèle de façon macroscopique pour qu'il puisse être interprétable et utilisable pour la déduction d'architectures de commande. Bien qu'une représentation vectorielle de l'ensemble ne nécessite qu'une réorganisation des équations sans devoir les modifier, une représentation « scalaire » amène quelques difficultés, liées à la notion de stockage énergétique, qui seront discutées plus profondément dans le paragraphe dédié au formalisme.

Une solution de représentation qui évite des stockages énergétiques couplés consiste à représenter le modèle dans une base modale, base dans laquelle les différentes équations dynamiques sont découplées. Le calcul d'une base de découplage modale à partir des équations originales est difficile dans la mesure où il existe une répétition de la fréquence de certains modes (dits modes rigides car de fréquence nulle). Si une solution consiste à utiliser des techniques itératives (Gramm–Schmidt, transformation de Householder, etc..) pour obtenir une base de découplage, nous préférons découpler par anticipation la dynamique de la tête avec celle des axes parallèles. Les axes orthogonaux sont ainsi découplés et il ne reste qu'à découpler les équations modélisant les axes parallèles. La recherche d'une base de découplage peut être aussi facilitée en simplifiant le modèle, opération aisée vu son caractère physique. En effet, la comparaison des énergies mises en jeu par les différents éléments du système réel ainsi que des mesures des grandeurs pertinentes permettent de déterminer quels sont les paramètres qui pourraient être négligés et à quel point les simplifications choisies altèrent le degré de précision du modèle.

En utilisant les techniques précédentes, l'équation dynamique (3.8) du système reste identique mais les morphismes M , H , X et K se représentent alors par des matrices diagonales dans une base de découplage $B^d = \{\vec{x}_1^d, \vec{x}_2^d, \dots, \vec{x}_n^d\}$. On notera que la base B^d est bien une base de découplage pour le modèle après simplifications et non pour le modèle initial. Elle peut alors être qualifiée de base pseudo-modale.

Le système peut alors être représenté par la REM en utilisant des accumulateurs d'énergie « scalaires » (mono entrée mono sortie) comme le montre la Figure 21.

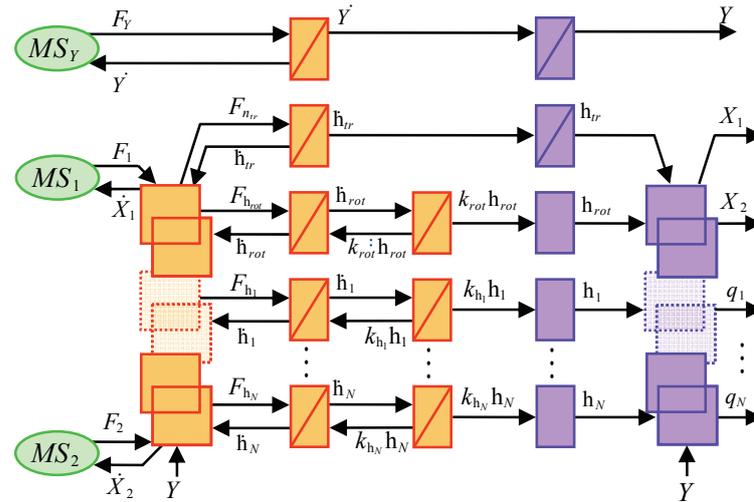


Figure 21 : REM d'un système gantry bi-actionné dans une base modale

En résumé, la modélisation physique fine d'un ensemble complexe permet de déduire des modèles de granularités diverses, mais toujours cohérents d'un point de vue énergétique. Un sous-système à paramètres distribués peut être aisément inséré dans un modèle plus classique à paramètres localisés par l'utilisation de la technique des modes finis. Un changement de base permet de représenter un système mécanique multi-actionné par un ensemble d'accumulateurs d'énergie mono-entrée découplés, facilitant ainsi la structure de la future commande qui sera ultérieurement déduite.

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème de la modélisation des systèmes en gantry bi-actionnés.

- [CI18], [CI19], [RI5], [RI7] traitent de la modélisation et de la représentation GIC d'un gantry bi-actionné où la poutre est supposée rigide.
- [CI17], [CI23], [CI25] traitent de la modélisation et de la représentation REM d'un gantry bi-actionné où la poutre est supposée rigide.
- [DIV5] traite de la modélisation et de la représentation REM d'un gantry bi-actionné où la poutre ne peut plus être supposée rigide.

2.2 Contributions à l'enrichissement des formalismes GIC et REM

Dus à la présence de couplages énergétiques internes, les systèmes électromécaniques à entrées multiples sont classiquement contrôlés par des commandes globales de type retour d'état. Notre objectif est à l'inverse de pouvoir réaliser une commande locale des d'énergies qui sont stockées dans le système. Notre technique étant basée sur l'inversion de la représentation causale du modèle, il est alors nécessaire de pouvoir représenter le système avec des accumulateurs énergétiques mono-entrée.

Si le paragraphe précédent dédié à la modélisation a montré qu'une telle représentation était possible, rien n'assure que chacun des accumulateurs soit indépendamment contrôlables. Il se pose alors la question de la commandabilité du système, ô combien importante quand on traite des systèmes MIMO [Fossard97].

Au-delà de cette question, les formalismes GIC et REM souffraient de ne pas être dotés des outils permettant de dégager les propriétés « automatiques » d'un système à partir de sa représentation. La thèse [TH1] (ou [Gomand09]) a fourni alors l'occasion de pallier ce manque en ce qui concerne le formalisme GIC appliqué aux systèmes linéaires. Les principales propriétés « automatiques » du formalisme GIC (transposables pour certaines à la REM) ont été établies à la lumière des propriétés développées pour le graphe de fluence [Mason56] et le Bond Graph [Dauphin-Tanguy00].

2.2.1 Commandabilité et observabilité structurelles d'un modèle

La représentation graphique ne faisant pas apparaître la valeur numérique des paramètres, les propriétés déduites ne peuvent être que structurelles. En effet, il se pourrait par exemple que deux éléments apparaissant sur une représentation s'annulent lors du passage aux valeurs numériques (simplification pôle-zéro) rendant caduque la propriété structurelle.

On définit un chemin causal en suivant la propagation causale des variables intervenant dans le système, à partir d'un point à un autre de la représentation, sans jamais passer plus d'une fois par un même élément accumulateur. Lorsque le point de départ du chemin causal est une entrée de commande et son arrivée la sortie à contrôler, le chemin causal est appelé chaîne de réglage [Bouscayrol03].

On montre qu'un système physique est structurellement commandable si sur la représentation GIC ou REM de son modèle linéaire (ou linéarisé) toutes les entrées des processeurs causaux énergétiques sont linéairement indépendantes et atteignables, en empruntant un chemin causal, par au moins une entrée de réglage. Le système, s'il est structurellement commandable, est nécessairement structurellement observable.

2.2.2 Ordre d'un système

Si un système est commandable, les sorties des processeurs d'accumulation d'énergie (indépendants) de la représentation de son modèle forment alors un jeu de variables d'état énergétiques indépendantes.

Le rang de la matrice d'état (composée exclusivement de variables énergétiques) est alors égal à l'ordre du système, qui correspond au nombre de processeurs causaux énergétiques indépendants dans le modèle.

2.2.3 Calcul de fonctions de transfert. Résonances et antirésonances

L'application de la règle de Mason permet à partir d'une représentation GIC de déterminer de façon simple et systématique les fonctions de transfert entrées-sorties d'un système.

On définit un chemin causal en suivant la propagation causale des variables intervenant dans le système, à partir de la grandeur d'entrée, jusqu'à celle de sortie, sans jamais passer plus d'une fois par un même élément (processeur ou flèche de lien).

Le nombre de résonances possibles d'une représentation GIC est défini par le nombre de boucles causales disjointes d'ordre 2 qu'il comporte. Deux boucles causales sont disjointes si elles ne comportent aucun élément, processeur ou lien, en commun.

Pour une fonction de transfert entrée-sortie déterminée sur une représentation GIC, le nombre d'antirésonances est défini par le nombre de boucles causales à la fois disjointes, d'ordre 2 et disjointes du chemin causal entrée-sortie considéré.

2.2.4 Intérêt de la déduction d'une architecture de commande en boucle ouverte

A partir d'un modèle représenté sous forme causale naturelle (on rappelle que seule la causalité physique, donc intégrale, est autorisée dans les représentations GIC et REM), il est possible de déduire une architecture de commande en boucle ouverte comme en boucle fermée [Barre04]. La

commande en boucle ouverte (ou feedforward) est une solution industrielle éprouvée permettant d'obtenir des performances dynamiques élevées. Elle permet d'exprimer la grandeur de contrôle (ou de réglage) d'un système en fonction des dérivées successives des grandeurs à contrôler.

La déduction d'une architecture de commande en boucle ouverte, obtenue par inversion d'une représentation de type GIC ou REM, permet de déduire la commandabilité structurelle d'un système.

En effet, s'il est possible d'établir la commande en boucle ouverte du système, c'est qu'il existe une « trajectoire » que le système est capable d'exécuter et donc que le système est commandable. Cette remarque, qui peut paraître évidente, est à l'origine de la théorie des systèmes plats [Fließ94].

La Figure 22 illustre par la REM le principe de déduction de la commande en boucle ouverte, d'un axe de robot polyarticulé anthropomorphe. Les différentes équations modélisant le système sont indicées de (1) à (4). Le principe d'inversion de la déduction d'une commande en boucle ouverte réside dans l'inversion directe des différents processeurs en partant de la variable de réglage (dans notre cas le couple c_m) vers la grandeur à contrôler (dans notre cas la position θ_m de l'axe par rapport au bâti). A chaque inversion d'un élément accumulateur (intégrateur) on dérive la grandeur de sortie. Les équations modélisant le système de commande sont indicées de (1') à (4').

La commande en boucle ouverte pouvant être établie sans difficulté, le système (comme on pouvait s'en douter) est donc bien structurellement commandable. Enfin, si on voulait implanter cet algorithme de commande, il faudrait connaître à l'avance (notion de planification de trajectoire) la référence de la dérivée quatrième de la de position, comme le montre l'équation (4').

Les exemples abordés dans le paragraphe suivant, dédié à la commande, montreront des exemples moins triviaux.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad c_m - c_k &= J_m \frac{d\Omega_m}{dt} + f_m \Omega_m & \longrightarrow & (1') \quad c_m^* = \tilde{J}_m \left(\frac{d\Omega_m}{dt} \right)^* + \tilde{f}_m \Omega_m^* + c_k^* \\
 (2) \quad \Omega_m - \Omega_s &= \frac{1}{K} \frac{dC_k}{dt} & \longrightarrow & (2') \quad \left(\frac{d\Omega_m}{dt} \right)^* = \frac{1}{\tilde{K}} \left(\frac{d^2 C_k}{dt^2} \right)^* + \left(\frac{d\Omega_s}{dt} \right)^* \\
 (3) \quad c_k - c_s &= J_s \frac{d\Omega_s}{dt} + f_s \Omega_s & \longrightarrow & (3') \quad \left(\frac{d^2 c_k}{dt^2} \right)^* = \tilde{J}_s \left(\frac{d^3 \Omega_s}{dt^3} \right)^* + \tilde{f}_s \left(\frac{d^2 \Omega_s}{dt^2} \right)^* + \left(\frac{d^2 c_s}{dt^2} \right)^* \\
 (4) \quad \Omega_s &= \frac{d\theta_s}{dt} & \longrightarrow & (4') \quad \left(\frac{d^3 \Omega_s}{dt^3} \right)^* = \left(\frac{d^4 \theta_s}{dt^4} \right)^*
 \end{aligned}$$

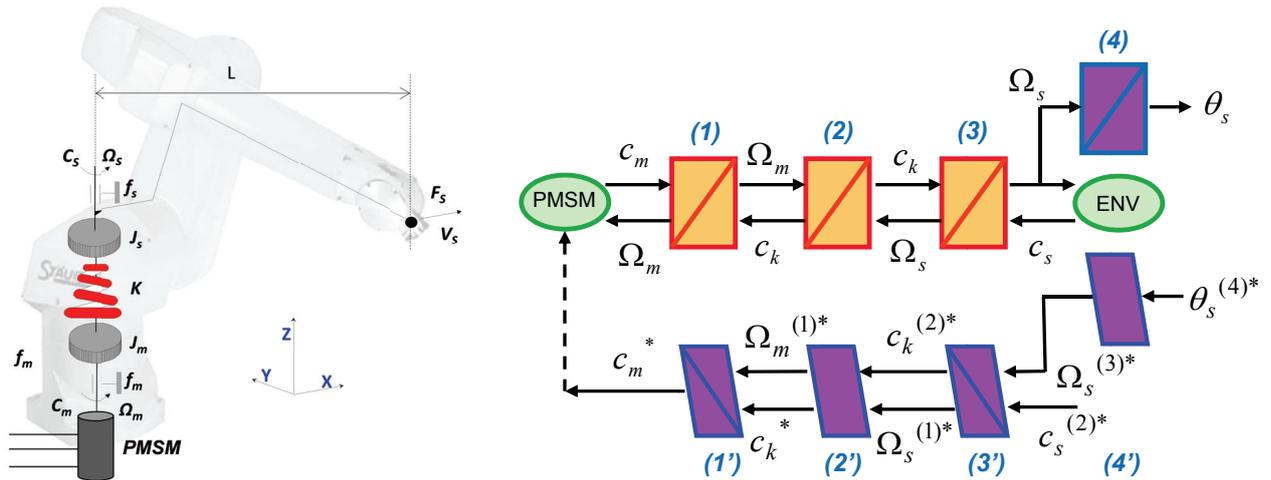


Figure 22 : Exemple de commande en boucle ouverte d'un axe de robot

2.3 Contributions à la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées

2.3.1 Commande par inversion

Le modèle du système ayant été représenté sous forme de GIC ou de REM, il « suffit » alors d'appliquer les règles d'inversion, définies par [Hautier96] et [Barre04] pour le GIC et par [Bouscayrol03] pour la REM, pour en déduire des architectures de commande.

Nous insisterons particulièrement sur l'étape nécessaire de vérification de la commandabilité structurelle de la représentation du système avant la déduction d'architectures de commande par inversion. En effet, s'il est possible de représenter un modèle non commandable à l'aide des formalismes développés, déduire une architecture de commande à partir d'une telle représentation n'a pas de sens, ou représente un contresens physique. Les quelques exemples suivants illustrent l'importance de la vérification de la commandabilité structurelle d'un système avant l'établissement d'une architecture de commande par inversion.

2.3.1.1 Commande d'un gantry bi-actionné dont la poutre est considérée comme flexible

La première application concerne la commande d'un gantry bi-actionné dont la poutre est considérée comme flexible. On a montré que ce type de système pouvait être représenté dans une base modale, à condition de tronquer la représentation aux premiers modes qui sont nécessaires à modéliser suffisamment finement le comportement du système. La Figure 23 montre la

représentation REM du système ainsi que les structures de commande en boucle ouverte et fermée qui en ont été déduites.

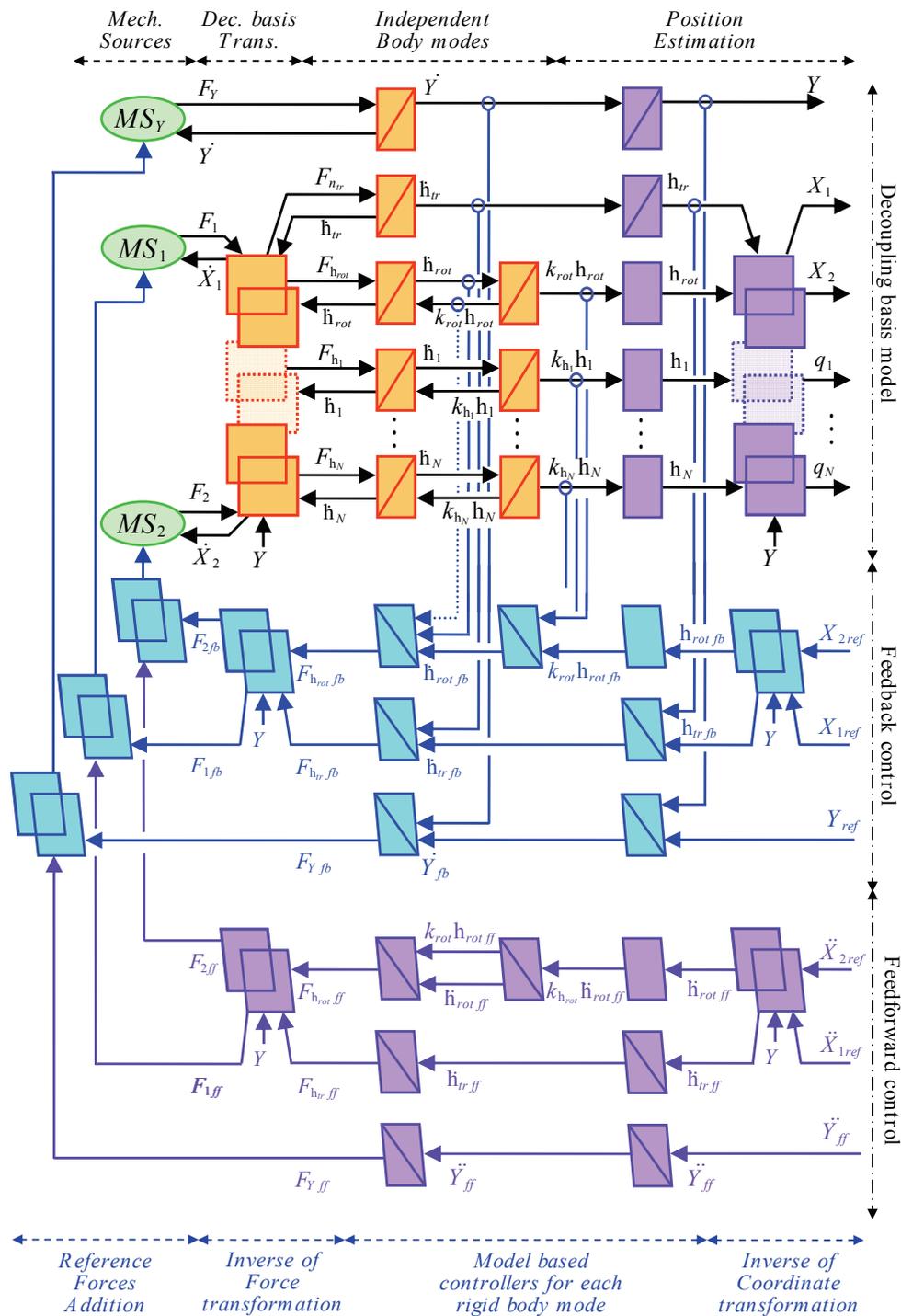


Figure 23 : Représentation REM d'un gantry bi-actionné et de ses structures de commande en boucle ouverte (ff) et fermée (fb)

Si on remarque que $(N+3)$ modes ont été considérés lors de la modélisation (trois modes rigides modélisant le mouvement de la tête, le mouvement linéaire et de rotation de la poutre, et N modes flexibles correspondant à ceux de la poutre), on constatera de la même façon que seuls 3 modes sont contrôlés, dans la mesure où le système ne possède que trois actionneurs. En effet, la représentation REM du système montre que le système n'est pas structurellement contrôlable et, bien que nous ayons représentés quand même $N+3$ modes, seuls 3 modes sont indépendamment contrôlables et d'ailleurs indépendamment contrôlés. On retrouve alors une commande indépendante des modes développée par [Meirovitch83] sous le vocable « Independent Modal Space Control ».

2.3.1.2 Commande de machines polyphasées en mode de fonctionnement dégradé

La deuxième application concerne la commande des systèmes polyphasés (à n phases) en mode dégradé d'alimentation. La déduction de la commande en mode normal d'alimentation impose l'utilisation de n correcteurs de courant (ou $n-1$ si la machine est couplée en étoile). Si les techniques classiques consistent à réécrire de nouveaux modèles lors de la perte d'une ou plusieurs phases, nous avons montré que nous préférons conserver un modèle unique de la machine, valable en mode normal comme dégradé. Le modèle étant unique, la structure de commande qui en est déduite aussi. Se pose alors le problème de l'adaptation du nombre de correcteurs au nombre de variables d'état à contrôler (assurance de la contrôlabilité de l'ensemble).

Nous avons développé deux approches complémentaires. La première approche consiste à conserver la même structure de commande et à recalculer de nouvelles références de courants alors que la deuxième approche ne nécessite pas de calcul des références mais demande de modifier (de façon mineure) la structure de commande.

La première approche consiste à ne pas adapter le nombre de correcteurs au nombre de variables d'état commandables. Pour respecter la physique du système, on impose alors des courants nuls dans les phases qui ne sont plus alimentées (on ne fait alors que ce que la nature nous permet de faire, imposer une énergie nulle là où elle ne peut être que nulle). L'emploi du formalisme vectoriel permet, comme on le montre ci-après, un calcul aisé des nouvelles références de courant.

Prenons l'exemple d'une machine synchrone à aimants permanents hexaphasée couplée en étoile et alimentée par un onduleur de tension dont on donne à la Figure 24 la REM et la structure de commande déduite par son inversion.

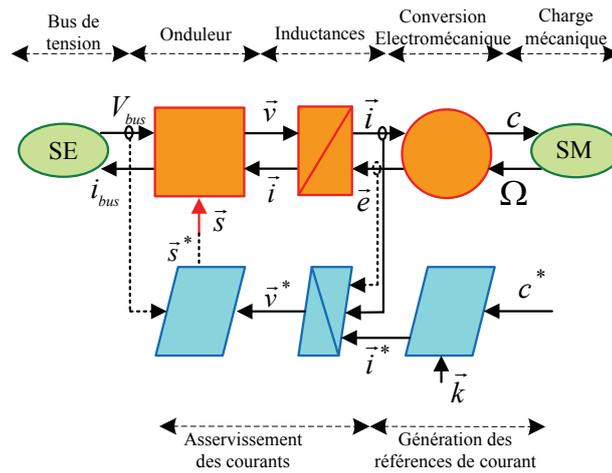


Figure 24 : REM d'une machine polyphasée et structure de commande déduite.

Une première méthode consiste à recalculer l'ensemble des références de courant de façon à minimiser les pertes par effet Joule globales. Ce problème, écrit sous forme matriciel, amène à devoir rechercher la solution optimale à l'aide de techniques mathématiques. On montre par une approche vectorielle que le problème possède une solution unique.

Si l'on considère que le vecteur courant \vec{i} peut avoir certaines de ses composantes imposées à zéro (dû à un couplage étoile ou à des phases ouvertes par exemple), alors l'équation du couple peut s'écrire :

$$c = \vec{\varepsilon}^{acc} \cdot \vec{i} \quad (3.10)$$

où $\vec{\varepsilon}^{acc}$ est le vecteur force électromotrice normalisé par la vitesse en imposant à zéro les mêmes composantes que celles du vecteur courant \vec{i} .

D'un point de vue de la commande, pour une référence de couple donnée, le vecteur courant de référence est donnée par la relation $\vec{i}^* = \vec{k} T^*$ où \vec{k} est un critère vectoriel permettant de passer d'une référence scalaire à une référence vectorielle. Si l'on choisit de vouloir travailler à couple maximal à pertes Joule données, le vecteur courant de référence \vec{i}^* doit alors être colinéaire au vecteur force électromotrice normalisé accessible $\vec{\varepsilon}^{acc}$. On obtient alors le critère :

$$\vec{k} = \frac{\vec{\varepsilon}^{acc}}{\|\vec{\varepsilon}^{acc}\|^2}$$

Les références de courant générées par cette méthode ne sont constantes qu'en régime de fonctionnement normal et dans une base de Park généralisée, à condition que chaque machine fictive soit à forces électromotrices sinusoïdales. Dans le cas contraire, les références de courant sont variables, quelle que soit la base de travail choisie, et imposent alors l'utilisation de correcteurs permettant des suivis de références non-constantes, tels que de type à Hystérésis.

On peut, si on le souhaite, choisir un critère moins contraignant que celui de minimiser les pertes Joule de façon globale et de choisir de ne minimiser ces pertes que dans certaines machines fictives. Cette stratégie permet de conserver des références de courant constantes en régime permanent dans certaines machines fictives (et de pouvoir alors les contrôler à l'aide de correcteurs de type PI) et d'imposer des références variables dans les autres machines. On choisira bien sûr de produire le couple avec les machines fictives les plus aptes à le faire (possédant une force électromotrice importante) et d'imposer les courants qui permettent de respecter les contraintes dues aux phases ouvertes dans les machines qui ne possèdent que des forces électromotrices faibles (l'idéal étant que ces f.e.m.s soient nulles pour ne pas produire de couple pulsatoire).

Prenons l'exemple d'une machine synchrone à aimants permanents pentaphasée couplée en étoile. On associe au système un espace euclidien de dimension 5 muni de la base naturelle $B^n = \{\bar{x}_1^n, \bar{x}_2^n, \bar{x}_3^n, \bar{x}_4^n, \bar{x}_5^n\}$. La théorie multimachines fictives nous permet de décomposer cette machine en deux machines fictives diphasées que nous indiquerons M_1 et M_2 et d'introduire la base de découplage $B^d = \{\bar{x}_{M1\alpha}^d, \bar{x}_{M1\beta}^d, \bar{x}_{M2\alpha}^d, \bar{x}_{M2\beta}^d, \bar{x}_z^d\}$. Le couple total que la machine peut développer s'écrit alors :

$$c = \vec{e} \cdot \vec{i} = \vec{e}_{M1} \cdot \vec{i}_{M1} + \vec{e}_{M2} \cdot \vec{i}_{M2}$$

$$\text{avec } \vec{i} = i_1 \bar{x}_1^n + i_2 \bar{x}_2^n + i_3 \bar{x}_3^n + i_4 \bar{x}_4^n + i_5 \bar{x}_5^n \quad \text{et} \quad \vec{i}_{Mx} = i_{Mx\alpha} \bar{x}_{Mx\alpha}^d + i_{Mx\beta} \bar{x}_{Mx\beta}^d, \quad x=\{1,2\}$$

Supposons que l'on souhaite, en mode dégradé, ne contrôler le couple que par le biais de la machine M_1 . Les références de courants $i_{M1\alpha}$ et $i_{M1\beta}$ dans cette machine sont alors imposées. Le calcul des références de courant $i_{M2\alpha}$ et $i_{M2\beta}$ de la machine fictive M_2 est alors simplifié en utilisant la propriété d'orthogonalité des vecteurs de la base de découplage. Pour illustrer ce propos, prenons l'exemple des phases 2 et 3 qui seraient ouvertes ($i_2 = i_3 = 0$), alors :

$$\begin{aligned} \vec{i} \cdot \bar{x}_2^n &= (i_1 \bar{x}_1^n + i_2 \bar{x}_2^n + i_3 \bar{x}_3^n + i_4 \bar{x}_4^n + i_5 \bar{x}_5^n) \cdot \bar{x}_2^n = i_2 \\ &= (i_{M1\alpha} \bar{x}_{M1\alpha}^d + i_{M1\beta} \bar{x}_{M1\beta}^d + i_{M2\alpha} \bar{x}_{M2\alpha}^d + i_{M2\beta} \bar{x}_{M2\beta}^d) \cdot \bar{x}_2^n = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{i} \cdot \vec{x}_3^n &= (i_1 \vec{x}_1^n + i_2 \vec{x}_2^n + i_3 \vec{x}_3^n + i_4 \vec{x}_4^n + i_5 \vec{x}_5^n) \vec{x}_3^n = i_3 \\ &= (i_{M1\alpha} \vec{x}_{M1\alpha}^d + i_{M1\beta} \vec{x}_{M1\beta}^n + i_{M2\alpha} \vec{x}_{M2\alpha}^d + i_{M2\beta} \vec{x}_{M2\beta}^d) \vec{x}_3^n = 0\end{aligned}$$

On se retrouve alors à devoir simplement résoudre un système de deux équations à deux inconnues (Les courants de la machine fictive M_2).

Cette méthode, bien que n'offrant pas un couple maximal à pertes Joule données, permet de conserver des correcteurs de type PI avec emploi d'opérateurs de rotations sur les machines fictives qui produisent du couple. De plus, on montre que les courants dans les autres machines fictives sont harmoniques et peuvent être, si la bande passante des correcteurs PI n'est pas suffisante, parfaitement contrôlés grâce à des correcteurs résonnants [Crévits10].

Une deuxième approche consiste à déconnecter un nombre d'asservissements de courant (réalisés sur les machines fictives dans une base de Park généralisée) correspondant au nombre de phases qui ne sont plus alimentées. Dans ce cas, on respecte la physique du système en ne contrôlant qu'un nombre de variables d'état indépendantes et atteignables par une entrée de commande (donc commandables). Si l'on désire conserver un couple constant dans certaines machines fictives, les PI avec opérateurs de rotation qui asservissent leurs courants doivent rejeter des perturbations de tension harmoniques engendrées par une alimentation déséquilibrée (certaines phases sont ouvertes). Les différents harmoniques des tensions de perturbation qui apparaissent peuvent être aisément déduits à l'aide de la méthode des dipôles ouvrants. On rappelle que cette méthode, exposée dans le paragraphe dédié à la modélisation, permet, par le biais de résistances variables insérées entre l'alimentation et la machine, de modéliser le système en fonctionnement normal ou dégradé d'alimentation par un modèle à topologie invariante. Si les correcteurs PI n'ont pas une bande passante suffisante pour rejeter les perturbations harmoniques de tension, on peut leur adjoindre des correcteurs résonnants.

Avec cette méthode, les courants dans les machines fictives sont exactement identiques à ceux calculés par la méthode précédente. Par contre, cette dernière méthode ne demande pas le calcul de nouvelles références de courants qu'il faut tabuler dans des mémoires de taille importante. Néanmoins, si le nombre de correcteurs utilisés en mode de défaut est bien inférieur à celui de la méthode précédente, car correspondant au nombre de phases encore connectées, les correcteurs sont plus complexes car composés de PI, réglés pour assurer un suivi des consignes constantes et, si nécessaire, de correcteurs résonnants réglés pour le rejet des perturbations harmoniques de tension.

Les formalismes GIC ou REM permettent de vérifier la commandabilité d'un système afin de déduire des architectures de commande où seules des variables d'état indépendantes sont commandées. Les différentes structures de commande ainsi déduites, ne comportent pas de contresens physiques.

Le calcul de grands nombres de références peut être plus facilement réalisé en posant le problème de façon vectorielle avant de passer à sa résolution sous forme scalaire, la propriété d'orthogonalité entre les vecteurs des bases utilisées étant d'un grand secours.

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème de la commande des systèmes en gantry bi-actionnés et des machines polyphasées en mode dégradé d'alimentation.

- [CN3], [CI12], [CI21] donnent les principes et les limites de la commande par inversion des entraînements électromécaniques.
- [BR1] montre comment on peut déduire différentes structures de commande, de complexités croissantes, à partir de modèles d'un gantry bi-actionné de granularités différentes.
- [DIV5], [CI17], [CI19], [CI23], [CI25] montrent comment les formalismes GIC et REM permettent de déduire des architectures de commandes pour le contrôle d'un robot en gantry bi-actionné.
- [DIV2], [CI6], [CI10], [RI4], utilisent le concept de commande multimachines pour la commande de machines polyphasées (à 5, 7 et 9 phases) dans le cas d'un fonctionnement en mode normal.
- [CI22], [CI27], [RI10], [RI11] exposent la méthode de calcul de références de courant en mode de défaut permettant d'obtenir un couple maximal à pertes Joule globales données.
- [DIV4], [CI11], [CI13], [CI14], [RI6], [RI8], traitent de la commande en mode dégradé d'une machine synchrone à sept phases par la méthode de recalcul des références de courants sans chercher à obtenir un couple maximal à pertes Joule données.
- [CI9], [CI24], [CI26], [RI9] traitent de la commande de machines polyphasées (à 3 et 7 phases) en utilisant une commande où le nombre de correcteurs (de type PI plus résonnants) est adapté au nombre de phases encore connectées.

2.3.2 Stratégies vectorielles de commande d'un onduleur polyphasé

Notre contribution majeure à la commande vectorielle des onduleurs de tension (Space Vector Modulation) concerne l'utilisation de produits mixtes, permettant un calcul des temps d'activation des interrupteurs et nécessitant des systèmes en temps réel moins gourmands. Ces travaux ont été initiés dans [Semail00] et [Kestelyn03].

On considère pour l'exemple un onduleur de tension à n bras tel que décrit à la Figure 11 auquel on associe un espace euclidien de dimension n muni d'une base $B^n = \{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, \dots, \vec{x}_n^n\}$ qualifiée de naturelle. Le vecteur tension généré par l'onduleur s'écrit alors :

$$\vec{v}_N = v_{1N}\vec{x}_1^n + v_{2N}\vec{x}_2^n + \dots + v_{nN}\vec{x}_n^n = \sum_{k=1}^n v_{kN}\vec{x}_k^n$$

Chaque tension v_{kN} pouvant posséder deux niveaux ($+E/2$ ou $-E/2$), le vecteur \vec{v}_N peut alors prendre un nombre fini de 2^n valeurs que l'on notera \vec{v}_{Nm} avec $m = \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$. Si lors d'une commande DTC (Direct Torque Control) on applique pendant un certain temps un de ces 2^n vecteurs, jusqu'au calcul suivant, la commande aux valeurs moyenne reste la plus utilisée (MLI ou PWM).

Dans la stratégie retenue aux valeurs moyennes, on choisit une période de MLI pendant laquelle on applique, dans le cas général, $n+1$ vecteurs \vec{v}_{Nm} différents tels que :

$$\langle \vec{v}_N \rangle = \sum_{j=0}^n \alpha_j \vec{v}_{Nj} \quad \text{où les } \alpha_j \text{ sont les rapports cycliques tels que } \sum_{j=0}^n \alpha_j = 1$$

Les vecteurs \vec{v}_{Nj} peuvent être choisis suivant plusieurs critères tels que leur proximité avec le vecteur à générer (de façon à réduire les ondulations de courant), le fait que l'on passe d'un vecteur à un autre en une seule commutation (de façon à réduire les pertes par commutation), etc...

La détermination des rapports cycliques α_j est assez directe en utilisant des produits mixtes, tels que :

$$\alpha_j = \frac{(\vec{v}_{N0} | \dots | \langle \vec{v}_N \rangle | \dots | \vec{v}_{Nm})}{(\vec{v}_{N0} | \vec{v}_{N1} | \dots | \vec{v}_{N(n-1)} | \vec{v}_{Nn})} \quad (3.11)$$

Quel que soit le rapport cyclique à calculer, le dénominateur est identique (donc calculé une fois pour toutes « offline »). Le numérateur ne demande que la réalisation de $n+1$ nouvelles additions et $n+1$ nouvelles multiplications à chaque période de MLI.

La méthode de calcul des temps d'activation des interrupteurs, basée sur l'emploi de produits mixtes, est peu gourmande en ressources de calcul car elle ne demande ni de tabuler des fonctions trigonométriques, ni de les calculer en temps réel. Elle est alors particulièrement adaptée à la mise en œuvre par FPGA, que l'on trouve maintenant directement intégré dans des systèmes à microcontrôleurs ou à DSP.

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème de la stratégie de commande des onduleurs de tension polyphasé, en rappelant les points forts dont ils traitent.

- [CI5] expose la commande en DTC d'une machine à cinq phases ;
- [RI2] détaille la méthode de calcul des temps d'activation des interrupteurs alimentant un onduleur polyphasé par la méthode des produits mixtes ;
- [CI30] présente la mise en œuvre en temps réel du calcul par FPGA des temps d'activation des interrupteurs, équipant un onduleur formé de trois ponts en H alimentant une machine triphasée dont les phases ne sont pas couplées, par la méthode des produits mixtes.

2.3.3 Défluxage des ensembles polyphasés

Le défluxage des machines polyphasées est un sujet qui n'est que très peu abordé dans la littérature. En effet, si défluxer une machine triphasée couplée en étoile consiste à ne contrôler que le courant suivant l'axe direct (issu de la transformation de Park), il est complexe de défluxer un ensemble de machines fictives, chacune associée à un sous-espace (ou plan dq). La plus grande difficulté réside dans la détermination de la tension maximale disponible dans chacune de ces machines fictives. Si dans la base naturelle les tensions sont simplement limitées par la tension de bus (qui est constante), les tensions maximales disponibles dans les machines fictives ne sont d'une part pas constantes et, d'autre part, dépendent les unes des autres.

Dans les thèses [TH4] et [TH5], nos recherches portent respectivement sur le défluxage d'une machine triphasée à phases non-couplées (configuration en open-windings) et d'une machine pentaphasée.

A la Figure 25, on peut voir l'influence de la valeur de la tension homopolaire (suivant la diagonale verte) sur l'excursion possible de la tension dans la machine principale (cône noir). Au plus la tension homopolaire est importante, au moins l'excursion de la tension dans la machine principale est importante. Nos recherches sont en cours pour établir des relations analytiques entre les différentes grandeurs influentes.

Concernant la machine pentaphasée, n'ayant pas encore trouvé comment obtenir une expression analytique entre les différentes grandeurs de la machine en zone saturée, nous avons proposé soit des stratégies analytiques simples (on ne défluxe qu'une machine fictive sur les deux), soit une optimisation des grandeurs mais de façon numérique. Là aussi, nos recherches sont en cours pour déterminer le meilleur outil permettant d'arriver à une expression analytique simple.

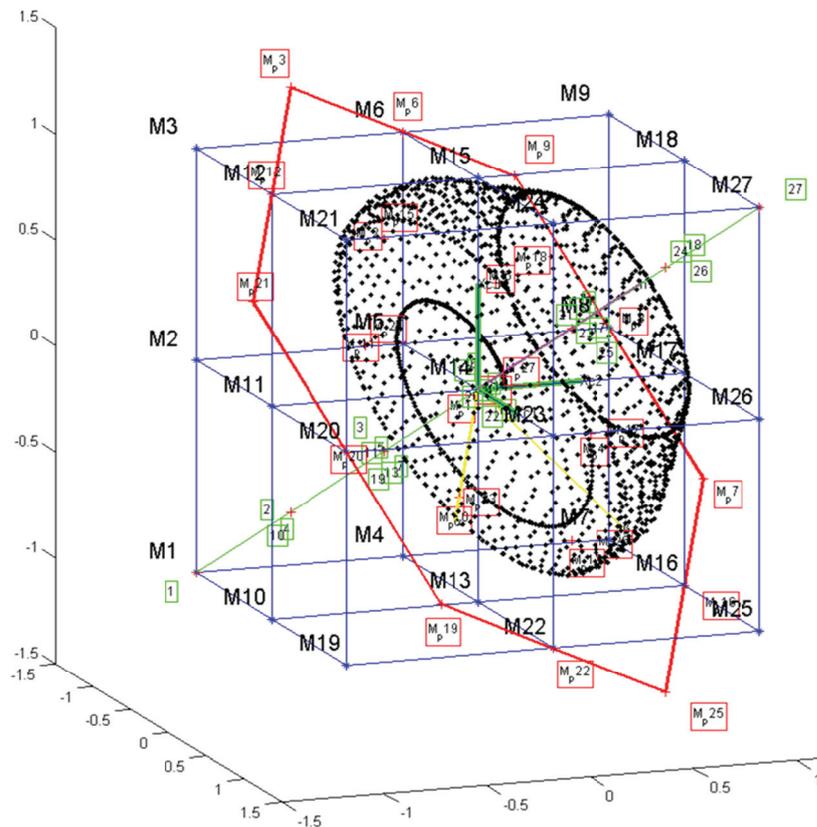


Figure 25 : Représentation 3D de l'influence de la tension homopolaire sur l'excursion maximale de la tension dans la machine principale [TH5].

Le formalisme vectoriel nous semble incontournable et devrait permettre de trouver une solution analytique au problème du défluxage « optimal » des machines polyphasées.

On détaille ci-après une liste des travaux qui ont été publiés sur le thème de la commande en mode défluxé de machines polyphasées.

- [CI31] propose des stratégies simples de défluxage d'une machine polyphasée à cinq phases dans lesquelles seules une des machines fictives est défluxée ;
- [CI32] expose le calcul de références de courants optimales d'une machine polyphasée à cinq phases obtenues de façon numérique.

Quatrième partie

Perspectives

Cette partie est consacrée aux différents travaux qui seront (ou devraient) être menés pour développer les outils permettant de répondre aux besoins émergents associés aux systèmes électromécaniques à entrées multiples et dynamiques couplées. Parmi ces besoins, nous avons identifié comme action à privilégier le fonctionnement des ensembles à leurs limites.

1. Aller oui, mais vers où ?

Notre contribution à la modélisation et la commande des systèmes électromécaniques à entrées multiples se caractérise par les méthodes et outils développés et proposés dans la Partie 3 de ce mémoire. Par rapport à la littérature et à l'existant, nous revendiquons l'obtention de résultats de manière plus unifiée et systématique.

Les multiples discussions que nous pouvons avoir avec la communauté scientifique, rencontrée particulièrement lors de séminaires et de congrès, à propos du formalisme que nous employons, finissent souvent par la mise en doute de la généralisation de la méthode si les hypothèses considérées n'étaient plus vérifiées. Le contexte technologique actuel donne beaucoup de sens à cette question.

En effet, les techniques d'optimisation multicritères, utilisées dès la conception préliminaire des systèmes amènent à des dimensionnements au plus juste. Les performances intrinsèques des composants (les aimants permanents par exemple qui possèdent des champs rémanents toujours plus élevés) et les conditions particulières rencontrées dans les systèmes embarqués (automobile, aéronautique ou espace où il existe des contraintes fortes de densité volumique de puissance, de niveaux de tension et courant) amènent à déplacer les zones de fonctionnement nominales vers les propres limites du système. Ces limites sont par exemple en tension, ce qui impose de défluxer les machines, en courant ou vitesse, imposant l'utilisation de techniques d'anti-emballement (anti-windup) pour les correcteurs, ou encore magnétiques ou élastiques, qui imposent une modélisation plus fine et non-linéaire.

L'approche que nous avons développée se trouve alors confrontée à la difficile tâche d'intégrer des non-linéarités autant continues (typiquement de type non-linéarités magnétiques ou élastiques) que discontinues (saturations en tension et courant, respectivement en effort et vitesse). La première réponse serait d'admettre qu'un outil ne peut pas tout faire et, par conséquent, que formalisme vectoriel et Représentation Energétique Macroscopique (REM) ne peuvent pas répondre à ces problèmes. Toutefois, il semble qu'il y ait des éléments favorables à leur adaptation aux cas non-linéaires.

Le formalisme vectoriel, bien qu'insuffisant s'il est uniquement considéré dans le cadre de l'algèbre linéaire, est celui qui est au centre de la théorie moderne des systèmes non-linéaires

[Isidori95] [Qiang01]. Enfin, la Représentation Énergétique Macroscopique présente des points de similitudes importants avec des théories récentes, particulièrement développées pour les systèmes non-linéaires.

Tout d’abord, nous avons montré que l’inversion directe de la REM d’un modèle permet de formuler des relations directes entre les états du système et les grandeurs à maîtriser et ses dérivées. Cette particularité est au centre de la théorie des systèmes plats [Fliess94].

Ensuite, l’énergie, au centre de notre outil, est choisie comme grandeur à « modeler » dans la technique de commande par passivité (passivity-based control), très connue dans l’étude des systèmes mécaniques [Ortega98].

Enfin, la déduction d’architectures de commande organisées en boucles imbriquées, chacune asservissant de façon locale un sous-système intégrateur (réservoir d’énergie cinétique ou potentiel) n’est pas sans rappeler la technique de commande non-linéaire dite de « backstepping » [Kanellakopoulos91], [Kokotovic92].

Ces différents constats nous amènent à penser que les outils développés jusqu’à maintenant peuvent sûrement être adaptés à la commande des systèmes électromécaniques fonctionnant à leurs propres limites. S’il n’existe pas aujourd’hui d’outil universel permettant d’appréhender l’ensemble des types de non-linéarités que la nature offre, notre volonté n’est pas de développer une nouvelle théorie mais de montrer comment notre démarche peut aider à résoudre quelques problèmes particuliers, mais bien réels.

2. Les axes de recherche futurs

2.1. Enrichissement du formalisme

La déduction d'architecture de commandes en boucle ouverte (feedforward) a permis de montrer que lorsqu'un système peut être représenté par la REM alors, dans la plupart des cas, il est commandable et observable.

Il serait intéressant de se rapprocher des automaticiens pour une démonstration formelle de ces propriétés. Des démonstrations existent déjà pour le Bond Graph [Dauphin-Tanguy00] et devraient pouvoir être a priori facilement adaptées à la REM comme elles ont été adaptées au Graphe Informationnel Causal (GIC) [Gomand08] .

2.2. Anti-emballement et défluxage

La limitation des tensions et courants, respectivement en effort et vitesse, d'un système est une action nécessaire pour éviter sa destruction ainsi que pour éviter la perte de sa contrôlabilité. Si lors d'un fonctionnement loin des limites on peut se contenter de décomposer le système en sous-systèmes fictifs indépendants commandés aux valeurs moyennes, le fonctionnement aux limites impose de considérer le système dans son ensemble. Ces exigences imposent à la commande de devoir posséder des performances qu'on retrouve dans un mode de fonctionnement en instantané.

Le mode de fonctionnement instantané est peu développé pour le moment. Néanmoins, les travaux qui proposent d'appliquer les méthodes issues de la théorie du MPC (Model Predictive Control) nous semblent s'engager dans la bonne voie [Rojas13]. On pourrait en effet penser anticiper les saturations (en se basant sur un modèle suffisamment fin du système) pour imposer les références adéquates à la gestion des saturations.

Enfin, concernant particulièrement le défluxage des machines polyphasées, nous avons montré qu'il restait encore beaucoup de travaux à réaliser, avant de pouvoir exprimer de façon analytique les contraintes à respecter sans devoir faire des hypothèses trop réductrices. Dans ce cas aussi, je pense que le formalisme vectoriel sera à même de proposer des solutions.

2.3. Approche paramétrique pour la robustesse

Notre approche de la commande étant complètement basée sur un modèle du système, de structure choisie a priori, on peut légitimement s'interroger sur la robustesse apportée par le réglage des correcteurs (de structure simple en général, PI voire PID). Les phénomènes non-linéaires pouvant d'ailleurs être considérés au premier ordre comme ayant comme simple effet d'apporter une incertitude aux paramètres du modèle considéré, cette approche pourrait permettre de considérer des problèmes où les non-linéarités sont faibles.

Il ne s'agit pas dans notre cas, comme le développent les méthodes robustes de l'automatique, de déduire une structure et un réglage de correcteur (d'ordre souvent très élevé et difficile à intégrer dans une structure de commande pratique, industrielle) permettant d'assurer un niveau de performances donné d'un système possédant des incertitudes paramétriques. En effet, dans notre cas nous imposons une structure de correcteur (PI, PID) et le travail consiste alors à régler les paramètres du correcteur vis-à-vis des incertitudes du modèle.

Suivant les travaux issus des méthodes polynomiales développées par Kharitonov sur les systèmes linéaires incertains, [Colas07] propose une méthode de réglage robuste, vis-à-vis des incertitudes paramétriques du modèle du système à contrôler, des paramètres d'un correcteur à structure fixe. L'idée consiste à utiliser des techniques d'optimisation basée sur des résolutions d'inégalités matricielles linéaires (LMI), résolutions simplifiées par l'utilisation de logiciels libres tels que YALMIP développé par l'université de Linköping en Suède. Appliquée avec succès à un robot cartésien à axe souple, cette méthode nous semble être particulièrement adaptée à notre problématique et mérite d'être essayée à la commande de systèmes électromécaniques à entrées multiples.

2.4. Modélisation modale et commande non-linéaires

Le chapitre dédié à nos contributions a montré que la commande modale (ou découplante, ou dans une base de découplage) présentait l'avantage de décomposer le système physique, complexe à commander, en un ensemble de problèmes simples fictifs mais conservant un caractère physique dans la mesure où ils rendaient compte chacun indépendamment d'une part des énergies mises en jeu dans le système. A un système de commande centralisé et complexe peut donc être substitué un ensemble de systèmes plus simples, en interaction. Cette stratégie permet une gestion locale des énergies, par le contrôle aisé des grandeurs d'état, gage de sécurité tant il est important d'éviter la détérioration ou la destruction du système.

La théorie modale, bien que puissante méthode d'analyse et de contrôle, souffre pourtant d'une limitation importante : basée sur le principe de superposition, elle n'est donc pas applicable, en toute rigueur, à des systèmes non-linéaires.

Cherchant à étendre la théorie modale, le concept de modes non-linéaires ainsi que celui d'équations modales non-linéaires a été admis pour certains groupes de systèmes mécaniques par [Rosenberg66]. Pour Rosenberg, un mode non-linéaire est le prolongement d'un mode linéaire dans ce sens que le système vibre à l'unisson, bien que de façon non-sinusoïdale. La généralisation de cette définition par [Shaw93] amène à considérer qu'un mode non-linéaire peut être défini comme décrivant une courbe invariante dans un espace des phases, espace à deux dimensions (une dimension étant homogène à une position, l'autre à la vitesse correspondante).

Si l'analyse modale non-linéaire, appliquée à des systèmes mécaniques à peu de degrés de libertés, a fait l'objet de nombreuses recherches [Pierre06], on trouve de plus en plus d'applications à l'analyse des réseaux de puissance. La première application de l'analyse non-linéaire aux réseaux de puissance semble avoir été faite par [Shanechi03] et [Pariz03]. L'avantage de la méthode est facilement perceptible : l'analyse des réseaux ne demande plus de simulation non-linéaire, car basée sur une extension de la théorie modale linéaire. Si les temps de calcul sont réduits, ceci facilitant la simulation des systèmes de grande dimension, on appréciera surtout la méthode pour la possibilité d'analyse qu'elle offre.

Le principe de la méthode consiste à appliquer une transformation modale linéaire, obtenue pour un point d'équilibre choisi, au système non-linéaire. Le système, préalablement décomposé en une série de Taylor, se trouve être modélisé par les mêmes modes qu'en linéaire auxquels s'ajoutent des combinaisons non linéaires de ces modes (appelées interactions modales). Enfin, en utilisant une approche basée sur la forme normale d'un champ de vecteur, le système est finalement décomposé en un ensemble de sous-systèmes indépendants, mais non linéaires.

La modélisation des machines triphasées en mode saturé n'est pas un sujet nouveau [Lemaire-Semail04]. Ont été particulièrement étudiés les modèles dq dans lesquels l'interaction entre les axes d et q en zone saturée ne peut être négligée [Levi00]. En revanche, l'étude de la modélisation des machines électriques polyphasées en régime saturé ne semble avoir été que pas ou très peu abordée. La représentation modale non linéaire devrait pouvoir répondre particulièrement à ce problème. En premier lieu, il serait intéressant de montrer que le couplage entre les axes d et q d'une machine triphasée peut être considéré comme une interaction modale.

L'application de la théorie modale non-linéaire à la commande des systèmes non-linéaires est rare. A notre connaissance, seul [Slater95] en fait état en l'appliquant à la commande d'un système mécanique non-linéaire à deux degrés de liberté. Basées sur l'approche proposée par Shaw et Pierre, Slater définit des transformations non-linéaires permettant de passer du système réel non-linéaire à des systèmes fictifs non-linéaires découplés. S'il semble toutefois que cette méthode soit difficilement généralisable, tant elle dépend des caractéristiques de la non-linéarité du système à commander, la faculté des phénomènes de saturation magnétique à être bien modélisés par une approche polynomiale devrait faciliter son application aux machines électriques.

Depuis les années 80, la géométrie différentielle se montre comme l'outil privilégié permettant l'analyse et la synthèse des systèmes de commande non-linéaires [Isidori95]. La théorie de la linéarisation exacte par retour d'état (Exact linearization via feedback) s'est rapidement affichée comme une voie privilégiée. L'idée consiste à trouver une commande par retour d'état permettant de transformer un système non-linéaire affine en un système linéaire contrôlable.

La Représentation Energétique Macroscopique amène à des structures de commande par boucles imbriquées qui, bien qu'elles puissent être considérées comme une structure à retour d'état très particulière, ne nous engage pas à nous diriger vers la voie de la « linéarisation exacte ».

Une alternative à la linéarisation exacte concerne le modelage de l'énergie (Energy Shaping Design) que l'on retrouve par exemple dans la commande passive (passivity-based design) [Ortega98]. Basée sur une représentation de type Euler Lagrange des systèmes, elle se trouve de fait bien plus physique que les méthodes utilisant une représentation d'état, d'abord plus mathématique. Bien que développée autour des concepts de conservation de l'énergie et de passivité, qui sont aussi au centre de notre formalisme, la théorie de l'« Energy Shaping Design » utilise une représentation des systèmes sous forme de systèmes interconnectés qui s'éloigne trop de la REM pour penser pouvoir l'adapter facilement.

Une autre technique de commande des systèmes non-linéaires se nomme la commande par backstepping [Kanellakopoulos91] [Kokotovic92]. Cette technique peut être appliquée si le système à commander se trouve pouvoir être écrit sous forme « strict feedback », forme qui correspond en beaucoup de points à celle obtenue quand un système est représenté par la REM puisque constituée en partie d'une somme d'intégrateurs mis à la chaîne.

L'idée qui se cache derrière le backstepping est de construire de façon récursive des correcteurs stabilisants tout en définissant à chaque étape une fonction d'énergie qui permettra, au final, de

construire un correcteur stabilisant le système dans son ensemble. A chaque étape du processus de construction du système de commande, jusqu'à temps que la dernière boucle soit atteinte, on :

- considère un premier sous-système en commençant par la sortie à contrôler ;
- définit l'erreur ;
- définit une fonction d'énergie, fonction candidate de Lyapounov, à qui à chaque étape on ajoute des termes ;
- détermine un correcteur local qui stabilise le système.

L'entrée de commande globale est finalement déterminée en rendant la dérivée de la fonction d'énergie globale du système négative.

Proche en bien des points avec l'architecture de commande qui serait issue de la REM, la technique de backstepping permet d'obtenir de façon formelle une commande qui stabilise un système non-linéaire. Cette technique, adaptée a priori à notre outil, pourrait permettre de garantir la stabilité d'un système non-linéaire asservi, ce qui fait défaut aujourd'hui. Notons qu'un premier essai de comparaison entre le backstepping et la déduction d'une commande par la REM a été réalisé au congrès VPPC2010 par le professeur Pierre Sicard (Université Québec Trois Rivières) et Walter Lhomme, de l'équipe « Commande » du L2EP.

Bibliographie

- A -

[Alger47] Alger, P. L.; West, H. R.; , "The Air Gap Reactance of Polyphase Machines," American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the , vol.66, no.1, pp.1331-1343, Jan. 1947.

- B -

[Barre04] P. J. Barre, "Commande et entraînement des Machines-Outils à Dynamique Elevée – Formalismes et Applications," Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Dec. 2004.

[Bennett12] J.W. Bennett, G.J. Atkinson, B.C. Mecrow, and D.J. Atkinson, "Fault-Tolerant Design Considerations and Control Strategies for Aerospace Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.59, no.5, pp.2049-2058, May 2012.

[Betin12] Betin, F.; Capolino, G.-A.; , "Shaft Positioning for Six-Phase Induction Machines With Open Phases Using Variable Structure Control," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.59, no.6, pp.2612-2620, June 2012

[Bianchi03] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Zigliotto, M.; Zordan, M.; , "Innovative remedial strategies for inverter faults in IPM synchronous motor drives," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.18, no.2, pp. 306- 314, June 2003.

[Bojoi06] R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo, and A. Tenconi, "Dual-three phase induction machine drives control—A survey," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol. 126, no. 4, pp. 420–429, 2006.

[Bolognani00] Bolognani, S.; Zordan, M.; Zigliotto, M.; , "Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.47, no.5, pp.1134-1141, Oct 2000.

[Bolognani11] Bolognani, S.; Calligaro, S.; Petrella, R.; Pogni, F.; , "Flux-weakening in IPM motor drives: Comparison of state-of-art algorithms and a novel proposal for controller design," Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on , vol., no., pp.1-11, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011.

[Bouscayrol00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J.P. Hautier et Ph. Delarue, « Macromodélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques », EJE, European Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, n°2, pp. 257-282, juin 2000.

[Bouscayrol03] A. Bouscayrol, "Formalismes de Représentation et de Commande Appliqués aux Systèmes Electromécaniques Multimachines Multiconvertisseurs," Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Dec. 2003.

[Bouscayrol05] A.Bouscayrol, G. Dauphin-Tanguy, R. Schoenfeld, A. Pennamen, G.H. Geitner, "Different energetic descriptions for electromechanical systems", EPE'2005 (Dresden), 9-2005.

[Bruyère09] A.Bruyère, « Modélisation et commande d'un alterno-démarrreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride », thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, 2009.

- C -

[Casadei08] D. Casadei, D. Dujic, E. Levi, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, "General Modulation Strategy for Seven-Phase Inverters with Independent Control of Multiple Voltage Space Vectors," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 23, No. 2, May 2008, pp.1921-1932.

[Casadei10] D.Casadei, M.Mengoni, G.Serra, A.Tani, L.Zarri, L.Parsa, "Control of a High Torque Density Seven-phase Induction Motor with Fieldweakening Capability", Proceedings of 2010 International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2010), pp. 2147-2152, 2010.

[Clarke43] Clarke E., "Circuit analysis of AC power systems", John Wiley and Sons, New York, N. Y., volume 1, 1943.

[Chuxiong11] Chuxiong Hu; Bin Yao; Zheng Chen; Qingfeng Wang; , "Adaptive Robust Repetitive Control of an Industrial Biaxial Precision Gantry for Contouring Tasks," Control Systems Technology, IEEE Transactions on , vol.19, no.6, pp.1559-1568, Nov. 2011.

[Colas07] Frédéric Colas, « Synthèse et réglage de lois de commande adaptées aux axes souples en translation -Application aux robots cartésiens 3 axes - », Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lille, 2007.

[Crevits10] Yvan Crévits, « Commande auto-adaptative de machines synchrones polyphasées en mode dégradé », Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de Lille1, 2010.

- D -

[Dauphin-Tanguy00] G. Dauphin-Tanguy, "Les bond graphs," Editions Hermes Science Europe, 2000, ISBN 2-7462-0158-5.

[Devasia00] Devasia, S.; , "Robust inversion-based feedforward controllers for output tracking under plant uncertainty," American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000 , vol.1, no.6, pp.497-502 vol.1, Sep 2000.

[Dongyun10] Dongyun Lu; Kar, N.C.; , "A review of flux-weakening control in permanent magnet synchronous machines," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010.

[Donnardieu03] Donnardieu G., Durand D., Neel D., Nunez E., Saint-Paul L. – « L'approche systémique : de quoi s'agit-il ? », Synthèse des travaux du Groupe AFSCET « Diffusion de la pensée systémique », Association Française de Science des Systèmes, 2003, pp.1-11.

[Dujic08] Dujic, D.; Grandi, G.; Jones, M.; Levi, E.; , "A Space Vector PWM Scheme for Multifrequency Output Voltage Generation With Multiphase Voltage-Source Inverters," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.5, pp.1943-1955, May 2008.

[Dwari08] Dwari, S.; Parsa, L.; , "An Optimal Control Technique for Multiphase PM Machines Under Open-Circuit Faults," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.5, pp.1988-1995, May 2008.

- E -

- F -

[Fei11] Fei, M.; Zanasi, R.; Grossi, F.; , "Modeling of multi-phase permanent magnet synchronous motors under open-phase fault condition," Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on , vol., no., pp.59-64, 19-21 Dec. 2011.

[Figueroa06] J. Figueroa, J. Cros, P. Viarouge, "Generalized transformations for polyphase phase-Modulation motors", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 21, Issue 2, pp. 332-341, June 2006.

[Fliess94] Michel Fliess, Jean Lévine, Philippe Martin, Pierre Rouchon, "Flatness and defect of nonlinear introductory. Theory and examples.", AS internal report A-284, January 1994.

[Fnaiech10] Fnaiech, M.A.; Betin, F.; Capolino, G.-A.; Fnaiech, F.; , "Fuzzy Logic and Sliding-Mode Controls Applied to Six-Phase Induction Machine With Open Phases," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.57, no.1, pp.354-364, Jan. 2010.

[Fortescue18] Fortescue C.L. « Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks », AIEE transactions, Part II, 37, p 1027-1140, 1918.

[Fossard97] Fossard A., "Systèmes multientrées-multisorties", Techniques de l'Ingénieur, Référence 7220, septembre 1997.

[Fu94] Jen-Ren Fu; Lipo, T.A.; , "Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.30, no.5, pp.1267-1274, Sep/Oct 1994.

- G -

[Garcia12] Ivan Garcia-Herreros, « Modélisation et commande d'un système multi-actionnés parallèle de grande dimension », Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, 2012.

[Gataric00] Gataric, S.; , "A polyphase cartesian vector approach to control of polyphase AC machines," Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , vol.3, no., pp.1648-1654 vol.3, 2000

[Ginsberg01] Ginsberg J.H., « Mechanical and Structural Vibrations », Jonh Wiley ans sons, Inc. ISBN 0-471-12808-2, 2001.

[Gomand08] Julien Gomand, « Analyse de systèmes multi-actionnés parallèles par une approche graphique causale. Application à un processus électromagnétique de positionnement rapide », Thèse de doctorat d'Arts et Métiers ParisTech, 2008.

[Goodwin00] Graham C., Goodwin , Stefan F. Graebe , Mario E. Salgado, "Control System Design", ISBN: 978-0139586538, Prentice Hall, 2000.

[Graybeal51] T.D. Graybeal. 1951. "Block Diagram Network Transformation", Elec. Eng., Vol. 70, pp. 985-990.

- H -

[Hamel81] Hamel J., May H., "Locomotives à moteurs synchrones", Colloque européen au Carrefour de la force motrice. Paris décembre 1981.

[Hautier96] J. P. Hautier, J. Faucher, « Le Graphe Informationnel Causal, outil de modélisation et de synthèse des commandes des processus électro-mécaniques». Bulletin de l'Union des Physiciens n°785, Cahier Spécial de l'Enseignement Supérieur 1996, pp. 167-189.

[Hautier99-1] J.P. Hautier, J.P. Caron, "Convertisseurs statiques : Méthodologie causale de modélisation et de commande". Editions Technip ISBN 2-7108-0745-9

[Hautier99-2] J. P. Hautier, J. Faucher and J. P. Caron, "Le graphe Informationnel Causal, un outil pour analyser, comprendre, représenter," Journées 3EI, Cachan, 1999.

[Hatua05] Hatua, K.; Ranganathan, V.T.; , "Direct torque control schemes for split-phase induction machine," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.5, pp. 1243- 1254, Sept.-Oct. 2005

[Hu11] Chuxiong Hu; Bin Yao; Zheng Chen; Qingfeng Wang; , "Adaptive Robust Repetitive Control of an Industrial Biaxial Precision Gantry for Contouring Tasks," Control Systems Technology, IEEE Transactions on , vol.19, no.6, pp.1559-1568, Nov. 2011

- I -

[Isidori95] A.Isidori, "Nonlinear Control Systems: An Introduction (3rd Edition), Springer-Verlag, New York, 1995.

[Iwasaki12] M.Iwasaki, S.Kenta, Y.Maeda, "High-Precision Motion Control Techniques. An approach to Improving Motion Performances", Industrial Electronics Magazine, March 2012.

- J -

[Janhs80] Jahns, Thomas M.; , "Improved Reliability in Solid-State AC Drives by Means of Multiple Independent Phase Drive Units," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.IA-16, no.3, pp.321-331, May 1980.

[Jones02] M. Jones and E. Levi, "A literature survey of state-of-the-art in multiphase AC drives," in Proc. UPEC, Stafford, U.K., 2002, pp. 505-510.

- [Julian07] A. L. Julian and G. Oriti, "A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 5, pp. 1371–1378, 2007.
- K -
- [Kanellakopoulos91] Kanellakopoulos, I.; Kokotovic, P.V.; Morse, A.S.; , "Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems," *Automatic Control, IEEE Transactions on* , vol.36, no.11, pp.1241-1253, Nov 1991.
- [Kestelyn03] X. Kestelyn, "Modélisation vectorielle multimachines pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasés", thèse de doctorat de l'Université de Lille1, 2003.
- [Kim00] B. K. Kim, W. K. Chung and I. H. Suh, "Robust Synchronizing Motion Control of Twin-Servo Systems Based on Network Modeling," in *Proc. 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia Dec. 2000.
- [Kim03] S. Kim, B. Chu, D. Hong, H. K. Park, J. M. Park and T. Y. Cho, "Synchronizing Dual-Drive Gantry of Chip Mounter with LQR Approach," *Proceeding of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*.
- [Klingshirn68] Klingshirn, E.A.; Jordan, H.E.; , "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.PAS-87, no.3, pp.624-631, March 1968.
- [Klingshirn83-1] Klingshirn, E.A.; , "High Phase Order Induction Motors - Part I-Description and Theoretical Considerations," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.PAS-102, no.1, pp.47-53, Jan. 1983.
- [Klingshirn83-2] Klingshirn, E.A.; , "High Phase Order Induction Motors - Part II-Experimental Results," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.PAS-102, no.1, pp.54-59, Jan. 1983.
- [Klingshirn85] Klingshirn, Eugene A.; , "Harmonic Filters for Six-Phase and Other Multiphase Motors on Voltage Source Inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.IA-21, no.3, pp.588-594, May 1985.
- [Kokotovic92] Kokotovic, P.V.; , "The joy of feedback: nonlinear and adaptive," *Control Systems, IEEE* , vol.12, no.3, pp.7-17, June 1992.
- [Krause65] Krause, P. C.; Thomas, C. H.; , "Simulation of Symmetrical Induction Machinery," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.84, no.11, pp.1038-1053, Nov. 1965.
- [Krause85] Krause, P.C.; , "The Method of Symmetrical Components Derived by Reference Frame Theory," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.PAS-104, no.6, pp.1492-1499, June 1985.
- [Kron39] G. Kron, "Tensor analysis of networks," John Wiley and Sons, Inc., London, 1939.
- [Kron51] G. Kron, "Equivalent Circuits of Electric Machinery," John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., 1951.

- [Lambrechts05] Paul Lambrechts, Matthijs Boerlage, Maarten Steinbuch, "Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems", Elsevier, Control Engineering Practice 13 (2005) 145–157.
- [Lemaire-Semail04] Betty Lemaire-Semail, Jean-Paul Louis et Frédéric Bouillaut, « Extension de la transformation de Park aux machines asynchrones en régime saturé », Chapitre 7 de : LOUIS Jean-Paul (sous la direction de) "Modèles pour la commande des actionneurs électriques" (Traité EGEM, série Génie électrique), ISBN 2-7462-0917-9, Hermes, Lavoisier, 2004, pp. 317-330.
- [Lesenne81] Lesenne J., Notelet F., Séguier G., « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et documentation, ISBN2-85206-089-2, 1981.
- [Levi00] Levi, E.; Levi, V.A.; , "Impact of dynamic cross-saturation on accuracy of saturated synchronous machine models," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.224-230, Jun 2000.
- [Levi07] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives—A technology status review," IET Electr. Power Appl., vol. 1, no. 4, pp. 489–516, Jul. 2007.
- [Levi08-1] Levi, E.; , "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.5, pp.1893-1909, May 2008.
- [Levi08-2] E. Levi, D. Dujic, M. Jones, G. Grandi "Analytical Determination of DC-Bus Utilization Limits in Multiphase VSI Supplied AC Drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, June 2008, pp.433-443.
- [Lhomme07] W. Lhomme, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique," Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), France, Nov. 2007.
- [Liu93] Tian-Hua Liu; Jen-Ren Fu; Lipo, T.A.; , "A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.29, no.5, pp.910-918, Sep/Oct 1993.
- [Liu12] Liu H., Zhu Z.Q., Mohamed E., Yongling Fu, Xiaoye Qi.: 'Flux-Weakening Control of Nonsalient Pole PMSM Having Large Winding Inductance, Accounting for Resistive Voltage Drop and Inverter Nonlinearities', IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27, (2), pp. 942-952.
- [Louis04] J.P. Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande", ISBN 2-7462-0916-0, Traité EGEM, Hermès Science, 2004.
- [Qiang01] Qiang Lu, Yuanzhang Sun, Shengwei Mei, " Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-7312-X ,2001.
- [Lyra02] Lyra, R.O.C.; Lipo, T.A.; , "Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.38, no.5, pp. 1351- 1360, Sep/Oct 2002.

- M -

- [Martin00] Martin, J.-P.; Meibody-Tabar, F.; Davat, B.; , "Multiple-phase permanent magnet synchronous machine supplied by VSIs, working under fault conditions," Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , vol.3, no., pp.1710-1717 vol.3, 2000.
- [Mason53] S. J. Mason, "Feedback theory: Some properties of signal flow graphs," MIT, Technical Report 153 of the Research Laboratory of Electronics, Feb 1953.
- [Mason56] S. J. Mason, "Feedback theory: Further properties of signal flow graphs," MIT, Technical Report 303 of the Research Laboratory of Electronics, reprinted from Proc. IRE, vol. 44, pp. 920-926, July 1956.
- [Meirovitch83] Leonard Meirovitch; Lawrence M. Silverberg; , "Control of non-self-adjoint distributed-parameter systems," Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on , vol.22, no., pp.281-285, Dec. 1983.
- [Meirovitch90] Meirovitch Leonard, "Dynamics and Control of Structures", John Wiley & Sons, Inc., 1990. - ISBN 0-471-62858-1.
- [Moubayed98] Moubayed N., F. Meybody-Tabar, B. Davat, "Alimentation par deux onduleurs de tension d'une machine synchrone double-étoile", Revue Internationale de Genie Electrique, vol. 1, no. 4, 1998, pp. 457-470.

- N -

- [Nelson74] Nelson, R.H.; Krause, P.C.; , "Induction Machine Analysis for Arbitrary Displacement Between Multiple Winding Sets," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on , vol.PAS-93, no.3, pp.841-848, May 1974.

- O -

- [Ortega98] Romeo Ortega, Julio Antonio Loria Perez, Per Johan Nicklasson, Hebertt J. Sira-Ramirez, Herbert Sira-Ramirez, "Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications", Communications and Control Engineering, Springer, ISBN-10: 1852330163, 1998.
- [Ortega01] R. Ortega, A. J. van der Schaft, I. Mareels, and B. Maschke," Putting Energy Back in Control", IEEE Control Systems Magazine, February 2001.

- P -

- [Pariz03] Pariz, N.; Shanechi, H.M.; Vaahedi, E.; , "Explaining and validating stressed power systems behavior using modal series," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.18, no.2, pp. 778- 785, May 2003.
- [Park01] H. K. Park, S. S. Kim, J. M. Park, T. Y. Cho and D. Hong, "Dynamics of dual-drive servo mechanism," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2001 Proceedings, vol. 3, pp. 1996-2000, June 2001.
- [Park29] Park R.H., "Two-reaction theory of synchronous machines", AIEE transactions, 48, p 716-731, July 1929.
- [Parsa05-1] Parsa, L.; Toliyat, H.A.; , "Five-phase permanent-magnet motor drives," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.1, pp. 30- 37, Jan.-Feb. 2005.

- [Parsa05-2] L.Parsa, Kim Namhun, H.A.Toliat, "Field Weakening Operation of High Torque Density Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives", Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC2005), pp. 1507-1512, 2005.
- [Parsa05-3] Parsa, L.; , "On advantages of multi-phase machines," Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE , vol., no., pp. 6 pp., 6-10 Nov. 2005.
- [Pavithran88] Pavithran, K.N.; Parimelalagan, R.; Krishnamurthy, M.R.; , "Studies on inverter-fed five-phase induction motor drive," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.3, no.2, pp.224-235, Apr 1988.
- [Paynter61] H.M. Paynter, « Analysis and Design of Engineering Systems », ISBN 0-262-16004-8, MIT Press, 1961.
- [Pierre06] Christophe Pierre, Dongying Jiang, Steven Shaw, "Nonlinear normal modes and their application in structural dynamic", Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Article ID 10847, Pages 1–15, 2006.
- [Pichoir63] J. Pichoir, « Cours d'électrotechnique », Volume 3, Fascicule 1, Editions Masson, 1963.
- Q -**
- R -**
- [Richard08] Pierre-Yves Richard, « Approches fondées sur des modèles énergétiques pour l'analyse formelle et la commande des systèmes non linéaires hybrides ». Habilitation à diriger des recherches de l'Université de Rennes 1. Présentée le 03 octobre 2008.
- [Robert-Dehault05] Etienne Robert-Dehault, « Modélisation dynamique, commande et conception de machines pentaphasées alimentées par des onduleurs MLI ». Thèse de doctorat de l'université de Nantes. Soutenue le 24 juin 2005.
- [Rojas13] Rojas, C. A.; Rodriguez, J.; Villarroel, F.; Espinoza, J. R.; Silva, C. A.; Trincado, M.; , "Predictive Torque and Flux Control Without Weighting Factors," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.60, no.2, pp.681-690, Feb. 2013
- [Rosenberg66] Rosenberg, R.M, "On Nonlinear Vibrations of Systems with Many Degrees of Freedom", Advances in Applied Mechanics, Volume 9, Issue C, Pages 155-242, 1966.
- [Rosenbrock62] Rosenbrock, H. H. "Distinctive problems of process control". Chem. Eng.Prog. 58, No. 9. 1962.
- [Ryu06] Hyung-Min Ryu; Ji-Woong Kim; Seung-Ki Sul; , "Synchronous-frame current control of multiphase synchronous motor under asymmetric fault condition due to open phases," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.42,no.4, pp.1062-1070, July-Aug. 2006.

- S -

- [Sanchez10] Roberto Sanchez, « Application des Bond graphs à la modélisation et à la commande de réseaux électriques à structure variable », thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, novembre 2010.
- [Semail00] E. Semail, « Outils et Méthodologie d'Etude des Systèmes Electriques Polyphasées. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace ». Thèse de doctorat, USTL, Juin 2000.
- [Semail09] E.Semail, "Entraînements électriques polyphasés : vers une approche système », Habilitation à Diriger des Recherches, Universités des Sciences et technologies de Lille, Juillet 2009.
- [Shanechi03] Shanechi, H.M.; Pariz, N.; Vaahedi, E.; , "General nonlinear modal representation of large scale power systems," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.18, no.3, pp. 1103- 1109, Aug. 2003
- [Singh02] G. K. Singh, "Multi-phase induction machine drive research—A survey," Electr. Power Syst. Res., vol. 61, no. 2, pp. 139–147, Mar. 2002.
- [Slater95] Joseph C. Salter, "Nonlinear Modal Control Method", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.18, N°3, May-June 1995.
- [SMM00] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J.P. Hautier, F. Meibody Tabar, M. Pietzak-David, « Multimachine Multiconverter System : application for electromechanical drives", European Physics Journal – Applied Physics, vol.10, n°2, pp 131-147, 2000 (MMS project od GdR SDSE, common paper of GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse).
- [Song11] Song Xuelei; Wen Xuhui; Cong Wei; , "Research on field-weakening control of multiphase permanent magnet synchronous motor," Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on , vol., no., pp.1-5, 20-23 Aug. 2011.

- T -

- [Tan04] K. K. Tan, S. Y. Lim, S. Huang, H. F. Dou and T. S. Giam, "Coordinated motion control of moving gantry stages for precision applications based on an observer-augmented composite controller," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol 12, Issue 6, pp.984 - 991, Nov. 2004.
- [Tanquary00] Tanquary Mark, Singer Neil and Rappole Whitney, "Method and apparatus for the control of gantry machines" Brevet 6.163.116. - United States, December 19, 2000.
- [Teo07] C. S. Teo, K. K. Tan, S. Y. Lim, S. Huang and E. B. Tay, "Dynamic modeling and adaptive control of a H-type gantry stage," Mechatronics, Vol. 17, Issue 7, pp. 361-367, Sept. 2007.
- [Toliyat91-1] Toliyat, H.A.; Lipo, T.A.; White, J.C.; , "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. I. Motor analysis," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.6, no.4, pp.679-683, Dec 1991.

[Toliyat91-2] Toliyat, H.A.; Lipo, T.A.; White, J.C.; , "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. II. Motor design and performance," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.6, no.4, pp.684-692, Dec 1991.

[Toliyat00] Toliyat, H.A.; Huangsheng Xu; , "A novel direct torque control (DTC) method for five-phase induction machines," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE , vol.1, no., pp.162-168 vol.1, 2000.

- U -

[Utkin93] Utkin, V.I.; , "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.40, no.1, pp.23-36, Feb 1993.

- V -

[Vernet04] Vernet. F, "Approche géométrique de la odélisation des machines électriques en vue de l'observation et de la commande » , Thèse de doctorat soutenue le 03 février 2004 à l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble.

- W -

[Wang03] Jiabin Wang; Atallah, K.; Howe, D.; , "Optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.39, no.5, pp. 2962- 2964, Sept. 2003.

[Ward69] Ward, E.E.; Härer, H.; , "Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor," Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of , vol.116, no.6, pp.980-984, June 1969.

[Welchko04] Welchko, B.A.; Lipo, T.A.; Jahns, T.M.; Schulz, S.E.; , "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations", Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.19, no.4, pp. 1108- 1116, July 2004.

[Wellstead79] P.E. Wellstead, "Introduction to physical Modelling", ISBN: 0-12-744380-0, Academic Press LTD, 1979.

[White59] White D.C., Woodson H.H., "Electromechanical Energy Conversion", John Wiley and Sons, 1959.

[Wilamowski11] Wilamowski B. M., Irwin J. D., "Power Electronics and Motor Drives", ISBN : 9781439802854, CRC Press, February 28, 2011.

- X -

- Y -

- [Yang03] J.-X. Yang, M.-C. Tsai and M.-F. Hsieh, "Identification and Control of a Linear Servo System," Proc. 4th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2003, Sept. 2003.
- [Yang11] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, pp. 1441-1451, May-June 2011.
- [Yu03] D. Yu, Q. Guo and Q. Hu, "Study on synchronous drive technique of biaxial linear servo motor based on decoupling control and internal model control with two-degree-of-freedom," Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003, ICEMS 2003 Proceedings, vol. 2, pp. 541-543, Nov. 2003.

- Z -

- [Zambettakis07] Irène Zambettakis et Frédéric Rotella, « Commande des systèmes par platitude », Techniques de l'Ingénieur, Référence 7450, septembre 2007.
- [Zanasi10] Zanasi, R.; , "The Power-Oriented Graphs technique: System modeling and basic properties," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010.
- [Zhao95] Yifan Zhao; Lipo, T.A.; , "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.31, no.5, pp.1100-1109, Sep/Oct 1995.
- [Zhao96-1] Y. Zhao and T. A. Lipo, "Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance. Part I: Machine modeling and multi-dimensional current regulation," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 3, pp. 570–577, Sep. 1996.
- [Zhao96-2] Y. Zhao and T. A. Lipo, "Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance. Part II: Field-oriented control and experimental verification," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 3, pp. 578–584, Sep. 1996.

- Liste classée des publications de Xavier KESTELYN-

Chapitres d'ouvrages et ouvrages scientifiques

[OS5] « *Vectorial Modeling and Control of Multiphase Machines with Non-salient Poles Supplied by an Inverter* », Chapter 7 of "*Control of Non-conventional Synchronous Motors*". ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc (<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-184821331X.html>), pages. 448-470, ISBN. 978-1-84821-331-9, 12-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

[OS4] "*Modélisation vectorielle et commande de machines polyphasées à pôles lisses alimentées par onduleur de tension*" Chapitre 5 de "*Commande d'actionneurs électriques synchrones et spéciaux*". Traité EGEM. Génie électrique. Editions Hermès. Lavoisier (<http://editions.lavoisier.fr/not.asp?id=3LKQX3W3A6XOOR>), pages. 193-240, ISBN. 978-2-7462-2596-1, 11-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

[OS3] "*Multiphase Voltage source Inverters*", Chapter 8 of "*Power electronic Converters - PWM Strategies and current control techniques*". ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc (<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1848211953.html>), pages. 203-242, ISBN. 978-1-84821-195-7, 3-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

[OS2] "*Modélisation Vectorielle Multimachines des Systèmes Polyphasés - Application à la commande des ensembles convertisseurs-machines*", Publication de la thèse aux Editions Universitaires Européennes (<https://www.editions-ue.com/>), ISBN. 978-613-1-54356-2, 10-2010, Xavier KESTELYN

[OS1] "*Alimentation polyphasée par onduleur de tension*", Chapitre 8 de "*Commande rapprochée de convertisseur statique 1 - modulation de largeur d'impulsion*". Traité EGEM. Génie électrique. Editions Hermès. Lavoisier (<http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=3LKWX3A3OAAOWH>), pages. 225-260, ISBN. 978-2-7462-2055-3, 9-2009, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

Revues internationales

[RI11] "*Etude comparative de différents correcteurs pour la commande optimale avec défauts d'une machine pentaphasée* ", EJEE, European Journal of Electrical Engineering (<http://ejee.revuesonline.com/>), VOL 15/4 - 2012 - pp.377-400, Fathia MEKRI, Jean-Frédéric CHARPENTIER, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

[RI10] "*A Vectorial Approach for Generation of Optimal Current References for Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machines in Real-time*". IEEE Transactions on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vol. 58, N°. 11, pages. 5057 - 5065 ISBN. 0278-0046, 2-2011, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL.

[RI9] "*Modélisation causale pour la commande auto adaptée de machines alternatives triphasées en mode dégradé*", EJEE, European Journal of Electrical Engineering (<http://ejee.revuesonline.com/>), Vol. 13, N°. 3, 6-2010, Yvan CREVITS, Xavier KESTELYN, Betty LEMAIRE-SEMAIL, Eric SEMAIL

- [RI8]** "*Vectorial Approach Based Control of a Seven-Phase Axial Flux Machine Designed for Fault Operation*", IEEE Transactions on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vol. 55, N°. 10, pages. 3682-3691, 10-2008, Fabrice LOCMONT, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN
- [RI7]** "*Modelling and Control of a Symmetrical Dual-drive Gantry System using Energetic Macroscopic Representation*", SSP, Solid State Phenomena (<http://www.scientific.net/SSP.144.181>), Vol. 144, pp. 181-185, 09-2008, Xavier KESTELYN, Julien GOMAND, Alain BOUSCAYROL, Pierre-Jean BARRE
- [RI6]** "*Fault Tolerant Multiphase Electrical Drives: The Impact Of Design*", The European Physic Journal - . Applied Physics (www.epjap.org), Vol. 43, N°. 2, pages. 159-163, 8-2008, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Fabrice LOCMONT
- [RI5]** "*Dual-drive gantry stage decoupling control based on a coupling model*", ElectroMotion (<http://electromotion.utcluj.ro/>), Vol. 15, N°. 2, pages. 94-98, ISBN. 1223-057X, 4-2008, Julien GOMAND, Xavier KESTELYN, Richard BEAREE, Pierre-Jean BARRE
- [RI4]** "*Investigation on Multi-star Structures for Large Power Direct-drive Wind Generator*", Electric Power Components and Systems (<http://www.tandf.co.uk/journals/uemp>), N°. 35, pages. 135-152, 2-2007, Stéphane BRISSET, Darius VIZIREANU, Xavier KESTELYN, Pascal BROCHET, Yves MILET, Daniel
- [RI3]** "*Weighted Control of Traction Drives With Parallel-Connected AC Machines*", IEEE Transactions on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vol. 53, N°. 6, pp. 1799-1806, 12-2006, Alain BOUSCAYROL, Maria PIETRAK-DAVID, Philippe DELARUE, Rosendo PENA-EGUILUZ, Paul-Etienne VIDAL, Xavier KESTELYN
- [RI2]** "*Multi-phase System Supplied by PWM VSI: A New Fast Algorithm to Compute Duty Cycle*", EPE Journal (<http://www.epe-association.org/epe/index.php>), Vol. 14, N°. 3, 8-2004, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Jean-Paul HAUTIER
- [RI1]** "*A Torque Estimator for a Switched Reluctance Motor using an Orthogonal Neural Network*", EERR, Electrical Engineering Research Report (<http://www.eerr.unina.it/>), N°. 14, pages. 8-14, 12-2002, Xavier KESTELYN, Bruno FRANCOIS, Jean-Paul HAUTIER

Conférences internationales avec acte

- [CI34]** "*Energetic description for the control of an innovative on board fast battery charger for electric vehicles*", European Electric Vehicle Congress, EEVC-2012, 11-2012, Brussels, Belgium, Guillaume CAMPO, Paul SANDULESCU, Walter LHOMME, Philippe DELARUE, Antoine BRUYERE, Xavier KESTELYN
- [CI33]** "*Resonant control of multi-phase induction heating systems*", IEEE Industrial Conference on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), IECON'12, 10-2012, Montréal, Canada, Kien Long NGUYEN, Stéphane CAUX, Xavier KESTELYN, Olivier PATEAU, Pascal MAUSSION
- [CI32]** "*Computation of Optimal Current References for Flux-weakening of Multi-Phase Synchronous Machines*", IEEE Industrial Conference on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), IECON'12, 10-2012, Montréal, Canada, Li LU, Bassel ASLAN, Luc KOBYLANSKI, Paul SANDULESCU, Fabien MEINGUET, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL

- [CI31]** *"Flux-weakening strategies for a five-phase PM synchronous machine"*, EPE 2011, Power Electronics and Applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), Birmingham, UK, 9-2011, pages 1-7, Li LU, Eric SEMAIL, Luc KOBYLANSKI, Xavier KESTELYN
- [CI30]** *"FPGA Implementation of a General Space Vector Approach on a 6-Leg Voltage Source Inverter"*, 2011 IEEE International Conference On Industrial Applications of Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), N°. 37, pages. 3482-3487, ISBN. 978-1-61284-969-0, 9-2011, Alexandru-Paul SANDULESCU, Lahoucine IDKHAJINE, Sebastien CENSE, Frédéric COLAS, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Antoine BRUYERE
- [CI29]** *"Fault Detection, Isolation and Control Reconfiguration of Three-Phase PMSM Drives "*, 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>) , Berkeley, USA, pages. 2091 - 2096, 6-2011, Fabien MEINGUET, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Johan GYSELINCK
- [CI28]** *"A Multiphase Traction/Fast-Battery-Charger Drive for Electric or Plug-in Hybrid Vehicles: Solutions for Control in Traction Mode"*, VPPC'10, IEEE International Vehicular Power Propulsion Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), Lille, France, 9-2010, Alexandru-Paul SANDULESCU, A. BRUYERE, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, L. DE SOUSA, B. BOUCHEZ
- [CI27]** *"High Order Sliding mode optimal current control of Five Phase Permanent magnet Motor under Open Circuited phase Fault Conditions"*, VPPC'10, IEEE International Vehicular Power Propulsion Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), Lille, France, 9-2010, F MEKRI, S BENELGHALI, J.F CHARPENTIER, Xavier KESTELYN
- [CI26]** *"Auto-Adaptive Fault Tolerant Control of a Seven-phase Drive"*, ISIE 2010, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Bari, Italie, 7-2010, Xavier KESTELYN, Yvan CREVITS, Eric SEMAIL
- [CI25]** *"Decoupling Basis Control of Dual-Drive Gantry Stages for Path-Tracking Applications"*, ISIE 2010, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), Bari, Italie, 7-2010, Ivan Mauricio GARCIAHERREROS, Xavier KESTELYN, Julien GOMAND, Pierre-Jean BARRE
- [CI24]** *"Fault Tolerant Control of a Seven-phase Drive by Degrees of Freedom Adaptation"*, ICIT 2010 – IEEE International Conference on Industrial Technology (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vina del Mare, Chile, 3-2010, Xavier KESTELYN, Yvan CREVITS, Eric SEMAIL
- [CI23]** *"Model-based control of a dual-drive H-type gantry stage on a decoupling base"*, ICIT 2010 - IEEE International Conference on Industrial Technology (<http://ieeexplore.ieee.org>), Vina del Mare, Chile, 3-2010, Ivan Mauricio GARCIAHERREROS, Xavier KESTELYN, Julien GOMAND, Pierre-Jean BARRE
- [CI22]** *"Generation of On-line Optimal Current References for Multi-phase Permanent Magnet Machines with Open-circuited Phases"*, IEEE International Electrical Machine and Drive Conference, IEMDC 09 (<http://ieeexplore.ieee.org>), Miami, USA, 5-2009, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Yvan CREVITS
- [CI21]** *"Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - expert level"*, European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2009, Barcelona, Spain, 9-2009, Alain BOUSCAYROL, Philippe DELARUE, Xavier GUILLAUD, Xavier KESTELYN, Betty LEMAIRE-SEMAIL, Walter LHOMME
- [CI20]** *"Analysis and Implementation of a 2-Degree Of Freedom Control for a Three-Phase Induction Machine"*, European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2007, Aalborg, Denmark, 9-2007, Yvan CREVITS, Xavier KESTELYN, Betty LEMAIRE-SEMAIL

- [CI19]** "*Physical Dynamic Modelling and Systematic Control Structure Design of a Double Linear Drive Moving Gantry Stage Industrial Robot*", European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2007 Aalborg, Denmark, 9-2007, Julien GOMAND, Richard BEAREE, Xavier KESTELYN, Pierre-Jean BARRE
- [CI18]** "*Influence of a high dynamic dual-drive gantry stage mechanical coupling on its performances*" International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2007, Lille, France, 9-2007, Julien GOMAND, Raphaël CARPENTIER, Xavier KESTELYN, Pierre-Jean BARRE
- [CI17]** "*Modelling and Control of a Symmetrical Dual-drive Gantry System using Energetic Macroscopic Representation*", International Conference on Mechatronic Systems and Materials, MSM 2007, Kaunas, Lithuania, 9-2007, Xavier KESTELYN, Julien GOMAND, Alain BOUSCAYROL, Pierre-Jean BARRE
- [CI16]** "*Comparison of 3-, 5- and 7-leg Voltage Source Inverters for low voltage applications*", IEEE International Electrical Machine and Drive Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), IEMDC 2007, 5-2007, Fabrice LOCMONT, Antoine BRUYERE, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Alain BOUSCAYROL, Jean-Marc DUBUS
- [CI15]** "*Easy-to-Implement Integral Numerical Simulation of Multi-phase Drives under Fault Supply Condition*", IEEE International Electrical Machine and Drive Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), IEMDC07, 5-2007, Xavier KESTELYN, Fabrice LOCMONT, Yvan CREVITS, Eric SEMAIL
- [CI14]** "*Fault tolerant multiphase electrical drives: the impact of design*", Colloquium on Reliability In Electromagnetic Systems (<http://ieeexplore.ieee.org>), IET 2007, 05-2007, Paris, France, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Fabrice LOCMONT
- [CI13]** "*Control of a Seven-phase Axial Flux Machine Designed for Fault Operation*", IEEE Industrial Conference on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), IECON'06, 11-2006, Paris, France, Fabrice LOCMONT, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Alain BOUSCAYROL
- [CI12]** "*Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions*", IEEE Industrial Conference on Industrial Electronics (<http://ieeexplore.ieee.org>), IECON'06, 11-2006, Paris, France, Pierre-Jean BARRE, Alain BOUSCAYROL, Philippe DELARUE, Eric DUMETZ, Frédéric GIRAUD, Jean-Paul HAUTIER, Xavier KESTELYN, Betty LEMAIRE-SEMAIL, Eric SEMAIL
- [CI11]** "*A vector controlled axial flux seven-phase machine in default mode*", International Conference on Electrical Machines, ICEM 2006, 9-2006, Athens, Greece, Fabrice LOCMONT, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN
- [CI10]** "*Experimental Tests on a 9-phase Direct Drive PM Axial-Flux Synchronous Generator*", International Conference on Electrical Machines, ICEM 2006, 9-2006, Athens, Greece, Darius VIZIREANU, Xavier KESTELYN, Stéphane BRISSET, Pascal BROCHET, Eric SEMAIL
- [CI9]** "*Investigation on Vector control of three-phase synchronous machines under supply fault conditions*", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (<http://ieeexplore.ieee.org>), SPEEDAM 2006, 5-2006, Taormina, Italy, Yvan CREVITS, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL
- [CI8]** "*Multi-Machine Modelling of Two Series Connected 5-phase Synchronous Machines: Effect of Harmonics on Control*", European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2005, 10-2005, Dresden, Germany, Eric SEMAIL, Emil LEVI, Alain BOUSCAYROL, Xavier KESTELYN

- [CI7] "Optimum use of DC bus by fitting the back-electromotive force of a 7-phase Permanent Magnet Synchronous machine", European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2005, 10-2005, Dresden, Germany, Fabrice LOCMET, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN
- [CI6] "Polyphased Modular Direct-Drive Wind Turbine Generator", European conference on Power Electronics and applications (<http://ieeexplore.ieee.org>), EPE 2005, 10-2005, Dresden, Germany, Darius VIZIREANU, Xavier KESTELYN, Stéphane BRISSET, Pascal BROCHET, Yves MILET, Daniel LALOY
- [CI5] "Direct Torque Control of a Multi-phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drive: Application to a Five-phase One", IEEE International Electrical Machine and Drive Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), IEMDC 2005, 5-2005, San Antonio, USA, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Dominique LORIOL
- [CI4] "Weighted Control of Traction Drives With Parallel-Connected AC Machines", IEEE International Electrical Machine and Drive Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), IEMDC 2005, 5-2005, San Antonio, USA, Alain BOUSCAYROL, Maria PIETRAK-DAVID, Phillipe DELARUE, Rosendo PENA-EGUILUZ, Paul-Etienne VIDAL, Xavier KESTELYN
- [CI3] "Right Harmonic Spectrum for the back-electromotive force of a n-phase synchronous motor", IEEE Industrial Application Society Annual Meeting (<http://ieeexplore.ieee.org>), IAS 2004, 10-2004, Seattle, USA, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Alain BOUSCAYROL
- [CI2] "Sensitivity of a 5-phase Brushless DC machine to the 7th harmonic of the back-electromotive force", IEEE Power Electronics Power Conference (<http://ieeexplore.ieee.org>), PESC 2004, 6-2004, Aachen, Germany, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Alain BOUSCAYROL
- [CI1] "Vectorial Multi-machine Modeling for a Five-Phase Machine", International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, 8-2002, Bruges, Belgium, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Jean-Paul HAUTIER

Conférences nationales avec acte

- [CN5] « Estimation de la Position d'une Machine Pentaphasée en contrôle Vectoriel », Conférence Electrotechnique du Futur, EF 2009, 9-2009, Compiègne, France, Li LU, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN
- [CN4] « Techniques de Compensation des Ondulations de Force d'un Moteur Linéaire Synchrone à Aimants Permanents - Application à la Machine de Production », 5ème Assises Machines et Usinage Grande Vitesse, Assises MUGV08, Nantes, France, 6-2008, Julien GOMAND, Ghislain REMY, Xavier KESTELYN, Pierre-Jean BARRE
- [CN3] « Commande par inversion pour entraînements électromécaniques, principe et limites », Conférence Internationale Francophone en Automatique, CIFA 06, Bordeaux, France, 6-2006, Pierre-Jean BARRE, Alain BOUSCAYROL, Philippe DELARUE, Eric DUMETZ, Frédéric GIRAUD, Jean-Paul HAUTIER, Betty LEMAIRE –SEMAIL, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL.
- [CN2] « Sensibilité d'une machine polyphasée aux harmoniques spatiaux », Conférence Electrotechnique du Futur, EF 2003, 12-2003, Gif-sur-Yvette, France, Eric SEMAIL, Arnaud CHARLIER, Xavier KESTELYN

[CN1] « *Modélisation multi-machine d'une machine synchrone polyphasée* ». Conférence Electrotechnique du Futur, EF 2001, 11-2001, Nancy, France, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN

Brevet

[BR1] "Système de régulation d'un portique à double moyen d'entraînement", Institut National de la Propriété industrielle

(<http://fr.espacenet.com/publicationDetails/biblio?KC=A1&date=20091113&NR=2930936A1&DB=fr.espacenet.com&locale=fr FR&CC=FR&FT=D>), N° de Brevet. FR 2 930 936 - B1, 8-2010, Julien GOMAND, Xavier KESTELYN, Pierre-Jean BARRE

Divers

[DIV6] "EMR and inversion-based control of an innovative charging system for EVs", International Workshop on Energetic and Macroscopic Representation, EMR'12 (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), 06-2012, Madrid, Spain, Xavier KESTELYN, Walter LHOMME, Philippe DELARUE

[DIV5] "EMR and inversion-based control of gantry systems", International Workshop on Energetic and Macroscopic Representation, EMR'11 (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), 07-2011, Lausanne, Switzerland, Xavier KESTELYN, Ivan GARCIA-HERREROS

[DIV4] « *Fault-tolerant control of multi-phase machines based on multi machine description* », International Workshop on Energetic and Macroscopic Representation, EMR'06 (<http://emr.univ-lille1.fr/cmsms/>), 11-2006, Lille, France, Eric SEMAIL, Fabrice. LOCMONT, Xavier KESTELYN

[DIV3] « *Analyse des harmoniques des machines fictives : couplages électriques* », séminaire SMM'03 du GdR ME2MS, 03-2003, Saint-Nazaire, France, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN

[DIV2] « *Critères de commande pour machines polyphasées* », séminaire SMM'03 du GdR ME2MS, 03-2003, Saint-Nazaire, France, Xavier KESTELYN, Eric SEMAIL, Jean-Paul HAUTIER

[DIV1] « *Concept multimachine pour machines polyphasées* », séminaire SMM'01 du GdR SDSE, 10-2001, Cachan, France, Eric SEMAIL, Xavier KESTELYN, Alain BOUSCAYROL