N° d'ordre H633

Rapport de synthèse

présenté à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

en vue d'obtenir

L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

par

Eric SEMAIL

Docteur en Génie Electrique de l'USTL

Agrégé de Physique Appliquée

ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES POLYPHASES :

VERS UNE APPROCHE SYSTEME

Soutenance le 10 Juillet 2009, devant le jury composé de :

Professeur	Maurice	FADEL	Rapporteur
Professeur	Bernard	MULTON	Rapporteur
Professeur	Philippe	VIAROUGE	Rapporteur
Professeur	Jean-Paul	HAUTIER	Examinateur
Professeur	Claude	MARCHAND	Examinateur
Professeur	Farid	MEIBODY-TABAR	Examinateur
Professeur	Francis	PIRIOU	Examinateur

Contexte et remerciements

C'est au sein du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP), sous les directions successives de J.P. Hautier puis F. Piriou, qu'ont été effectuées les activités de recherche présentées dans ce mémoire s'étalant de 2000 à 2009. Cette période a été celle du développement du Centre National de Recherche Technologique Futurelec dont les apports financiers, couplés au soutien fort de mon établissement d'accueil des Arts et Métiers Paristech, ont permis l'application pratique des concepts théoriques réalisés en termes de conception dans l'équipe Modélisation et en termes de contrôle dans l'équipe Commande.

Je tiens particulièrement à exprimer mes remerciements à :

- M Maurice Fadel, professeur des Universités à l'ENSEEIHT de Toulouse et directeur adjoint du LAPLACE, de m'avoir fait l'honneur, malgré ses lourdes charges, de rapporter sur mes travaux en considérant tant les aspects scientifiques, particulièrement sous la problématique Système, que les aspects citoyens induits par la problématique reconnue à présent de l'énergie ;

- M Bernard Multon, professeur des Universités au laboratoire SATIE de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, pour son rapport à l'analyse critique et stimulante suivie d'échanges nourris et enrichissants sur les différentes disciplines qu'explore le travail présenté dans le mémoire ;

- M Philippe Viarouge, professeur des Universités au LEEPCI de l'Université Laval au Québec, d'avoir également rapporté sur le travail. Sa connaissance du domaine des machines polyphasées et sa vision plus générale de concepteur de machine doté d'une riche expérience m'ont permis d'obtenir un regard, une conviction et une analyse précieuses sur ce petit bout de recherche multidisciplinaire des entrainements électriques polyphasés ;

- M Farid Meibody-Tabar, professeur des Universités au laboratoire GREEN à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine, d'avoir bien voulu assister au jury de thèse et apporter son expertise dans le domaine des machines polyphasées ;

- M Claude Marchand, professeur des Universités au LGEP de l'Université de Paris XI, d'avoir participé au jury de thèse et porté un regard et une analyse de spécialiste en défaillance de systèmes.

Mes remerciements s'adressent également :

- à Jean Paul Hautier pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury mais aussi pour avoir, d'une part, impulsé au L2EP il y a quelques années, en tant que chef d'équipe Commande, l'approche d'analyse graphique des systèmes, et d'autre part, en tant que directeur du L2EP puis des Arts et Métiers, d'avoir apporté son soutien à la poursuite de cette thématique de recherche pourtant peu communicante ;
- à Francis Piriou, directeur du L2EP, mais aussi responsable de mon mémoire de thèse, pour les discussions toujours contructives, la confiance témoignée ainsi que le rôle délicat de modérateur vis-à-vis d'opinions parfois abruptes ;
- aux membres de l'équipe Modélisation avec lesquels j'ai fait un bout de parcours lors de la conception et de la caractérisation de ces machines spéciales ; que Jean-Frédéric Charpentier,

chercheur à l'IRENav sur les aspects conception de machines trouve aussi ma reconnaissance pour les échanges féconds qui ont eu lieu dans le cadre des travaux de thèses de Franck Scuiller et de Laurent Drouen ;

- aux membres de l'équipe Commande et plus particulièrement, Alain Bouscayrol infatiguable promoteur de la Représentation Energétique Macroscopique et avec qui les discussions sont souvent animées, Xavier Kestelyn dont la thèse m'a permis de valider expérimentalement mais aussi de transformer une approche de modélisation quelque peu absconse en une modélisation graphique, féconde de par sa capacité à être transmise et à favoriser l'imagination;
- à Betty Semail, à la fois responsable de l'équipe Commande et épouse, qui a encouragé et tempéré un collègue et mari dans son cheminement vers une recherche académique tardive ;

Bien sûr, mes pensées vont aussi aux mastériens et doctorants co-encadrés pendant ces années avec lesquels je me plaisais à imaginer, de part les relations individuelles et non pas collectives, une sorte de compagnonnage ciselant de nouveaux entraînements conçus pour résister aux outrages du temps. Enfin, je remercie les techniciens, secrétaires et ingénieurs qui m'ont épaulé dans les réalisations expérimentales (de la conception aux tests en passant par les bons de commande !) .

Un enseignant-chercheur ne peut oublier sa deuxième moitié de vie professionnelle qui est celle d'enseignant. Elle s'imbrique étroitement avec la première d'autant plus que se dessine pour le domaine du Génie Electrique Energétique une mutation sociétale, et pas uniquement technique, du fait de la prise de conscience des contraintes énergétiques futures. Si la technique ne peut tout résoudre loin s'en faut, elle peut néanmoins apporter son efficacité, si la politique le veut, pour l'accompagnement au passage à une société de raréfaction des énergies fossiles. Au sein des Arts et Métiers, dont je partage depuis 2001 les évolutions, les ingénieurs en formation verront dans leur carrière cette transformation qui devrait être comparable à la révolution informatique/internet de ces vingt dernières années. Il nous faut donc les préparer.

Je remercie les collègues enseignants des Arts et Métiers mais aussi les techniciens et secrétaires qui oeuvrent avec cet esprit de mission à assumer collectivement.

Je remercie enfin mes deux collègues professeurs agrégés mais aussi chercheurs dans l'âme, Jean-François Sergent et Michel Amberg, avec lesquels j'ai partagé une dizaine d'années à l'Université. Pendant cette période, mon activité professionnelle était consacrée à la formation des Maitres dont dépend, je pense, l'avenir de la diffusion et de l'entretien du tissu de compétences techniques et technologiques du pays.

Loin des vicissitudes, et peut être même, de certaines agitations de la recherche professionnelle académique, l'agrégé de Physique Appliquée que j'étais, a alors mûri en s'imprégnant des contraintes de la technologie, pour finalement explorer une petite voie de systèmes permettant d'améliorer, on peut l'espérer, de façon durable la qualité d'un service rendu.

SOMMAIRE

ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES POLYPHASES :.....i

VERS UNE APPROCHE SYSTEME i

A. Cursus universitaire et professionnel/Résumé des activités 1

I. ÉTAT CIVIL-FORMATION-EMPLOIS OCCUPES :.....1
II. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT RECENTES ET ACTUELLES:.....2
1. NIVEAU MASTER 2IEME ANNEE (M2) OU TROISIEME ANNEE ELEVE-INGENIEUR..... 2
2. NIVEAU MASTER 1ERE ANNEE (M1) A L'ENSAM..... 2
3. NIVEAU LICENCE 3 EME ANNEE (L3) A L'ENSAM:..... 3
4. DETAIL DE MON INVESTISSEMENT DANS LES ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT A L'ENSAM..... 3
5. DETAIL DE MON INVESTISSEMENT DANS LES ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT HORS ETUDIANTS ENSAM..... 5
III. RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES, ADMINISTRATIVES ET COLLECTIVES.....5
IV. SYNTHESE CHIFFREE DE LA PRODUCTION ET DE L'ENCADREMENT SCIENTIFIQUE :.....7
V. ACTIVITES COLLABORATIVES : PARTICIPATION A L'ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES, A DES COMITES DE LECTURE, EXPERTISE ET CHAIRMAN, RELATIONS INTERNATIONALES 9
VI. ACTIVITES D'ENCADREMENT DE RECHERCHE ET DE TRANSFERT/VALORISATION DEPUIS 2001.....10
1. ENCADREMENT SCIENTIFIQUE..... 10
2. TRANSFERT ET VALORISATION INDUSTRIELLES ET/OU INSTITUTIONNELLES PAR ACTIVITES CONTRACTUELLES..... 12
VII. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENTS ET DE RECHERCHE AVANT 2001 13
1. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENTS EN TANT QUE PRAG..... 13
2. CONTEXTE PARTICULIER DES ACTIVITES DE RECHERCHE AVANT 2001 EN TANT QUE PRAG 15
VIII. INTERET ET PROBLEMATIQUE DU THEME DE RECHERCHE.....16
IX. OUTILS ET ENCADREMENTS POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'ACTIVITE RECHERCHE.....18
X. COLLABORATIONS.....22
XI. COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS.....24
1. PUBLICATIONS DANS DES REVUES INTERNATIONALES 25
2. PUBLICATIONS DANS DES REVUES A CARACTERE PEDAGOGIQUE..... 27
3. COMMUNICATIONS DANS DES CONGRES INTERNATIONAUX AVEC ACTES 27
4. COMMUNICATIONS DANS DES CONGRES NATIONAUX AVEC ACTES..... 31
5. CONGRES ET COLLOQUES DIVERS 32
6. OUVRAGES..... 33

PREAMBULE.....35

B. Contexte de la recherche sur les entraînements électriques polyphasés.....37

I. LES MACHINES ELECTRIQUES POLYPHASEES 37
1. APPROCHE DES PROBLEMATIQUES PAR ETUDE DE CAS..... 40
2. LES APPROCHES CONCEPTUELLES GENERIQUES 47

II. LES CONVERTISSEURS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE POUR MACHINES POLYPHASEES 49
1. APPROCHE DES PROBLEMATIQUES PAR ETUDE DE CAS 49
2. LES APPROCHES CONCEPTUELLES GENERIQUES POUR ONDULEURS 54
III. L'ENTRAINEMENT ELECTRIQUE : DUALITE CONCEPTION/COMMANDE 56
1. ENTRAINEMENTS « TRIPHASES » AVEC TROIS COURANTS INDEPENDANTS 56
2. ENTRAINEMENTS HEXAPHASES 58
3. ENTRAINEMENTS PENTAPHASES ET HEPTAPHASES 59

C. Développement d'une approche globale 69

I. LES MACHINES ELECTRIQUES POLYPHASEES 69
1. JUSTIFICATION DE L'APPROCHE VECTORIELLE : COMPROMIS TENSEUR/MATRICE 69
2. L'APPORT DE LA REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE POUR LA MACHINE : L'APPROCHE MULTIMACHINE 75
3. DU MODELE MULTIMACHINE VERS LA CONCEPTION SYSTEME 79
4. LIMITES ET EXTENSION DES MODELES 86
II. APPROCHE VECTORIELLE ET ONDULEURS DE TENSION MULTI-BRAS 88
1. UNE MODELISATION INDEPENDANTE DE LA CHARGE 88
2. UN MODELE VU DE LA CHARGE : MODELE MULTI-CONVERTISSEUR 92
III. L'ENTRAINEMENT ELECTRIQUE POLYPHASE 94
1. CONTROLE VECTORIEL GENERALISE 95
2. DU FONCTIONNEMENT DEGRADE A LA CONCEPTION DE LA MACHINE 97
3. DU CONTROLE DES PHENOMENES DU SECOND ORDRE 99

D. Perspectives 101

I. EXAMEN PROSPECTIF DU POSITIONNEMENT DES ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES POLYPHASES 101
1. MACHINES ELECTRIQUES 112
2. LES CONVERTISSEURS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 115
3. L'ENTRAINEMENT ELECTRIQUE POLYPHASE 118
II. DEVELOPPEMENT D'UN AXE « ENTRAINEMENTS DESTINES AU DEVELOPPEMENT DURABLE » 119
III. CONCLUSION SUR LES « PERSPECTIVES » 123

E. Bibliographie 125

F. ANNEXES 139

I. MODELISATION VECTORIELLE DES ONDULEURS DE TENSION 139
1. STRUCTURE A N-BRAS : TERMINOLOGIE, NOTATIONS ET EXEMPLES 139
2. COMMANDE AUX VALEURS MOYENNES : MODULATION DE LA LARGEUR DES IMPULSIONS 143
II. ELEMENTS DE SYNTHESE SUR LES TRAVAUX DE FRANCK SCUILLER 155
1. AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UNE MACHINE EN CHANGEANT LE NOMBRE DE PHASES 155
2. AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UNE MACHINE POLYPHASEE EN CHANGEANT L'AIMANTATION ET/OU LE BOBINAGE 160

3. CONCLUSION 166
III. SYNTHESE DES TRAVAUX DE PUBLICATIONS DE FABRICE LOCMENT 169

Tables des figures

Figure 1: banc expérimental (thèse F Locment) *20*
Figure 2: structure d'algorithmes pour la conception *20*
Figure 3: machine à faible couple pulsatoire (Thèse F. Scuiller) *20*
Figure 4: banc expérimental alterno-démarreur (thèse A Bruyere) *21*
Figure 5: hélice réalisée à l'IRENav *22*
Figure 6: prototype RIM (Thèse L. Drouen) *22*
Figure 7: schéma d'une machine double -étoile *49*
Figure 8: projection de l'onduleur dans le plan caractéristique associé au premier harmonique *52*
Figure 9: projection de l'onduleur dans le plan caractéristique associé à l'harmonique 3 ..... *52*
Figure 10: représentation de l'onduleur triphasé de tension par l'hexagone externe dans le cas d'une commande par vecteur d'espace, par l'hexagone intérieur dans le cas d'une commande à homopolaire nul (extrait de [T1]) pour une charge couplée en étoile sans neutre sorti *69*
Figure 11: représentation REM d'un ensemble onduleur/machine pentaphasée couplée en étoile (extrait de [CI9]) *76*
Figure 12: REM avec structure de commande obtenue par inversion (extrait de [CI10]) *77*
Figure 13: structure comportant un onduleur à 5 bras et deux machines pentaphasées indépendantes (extrait de [CI13]) *78*
Figure 14: représentation REM de la structure de la Figure 11 (extrait référence [CI14]) *78*
Figure 15: structure avec commande de la Figure 12 (extrait de [CI13]) *79*
Figure 16: synoptique entrainement *80*
Figure 18: banc expérimental *80*
Figure 19: force électormotrice *80*
Figure 20: Courant de phase sans compensation de l'harmonique 7 ..... *80*
Figure 21: projection du courant dans la machine principale MM et la machine secondaire SM mettant en évidence l'impact de l'harmonique 7 dans SM visible Figure 20 ..... *80*
Figure 22: Courant de phase avec compensation de l'harmonique 7 ..... *80*
Figure 17: rotor/stator *80*
Figure 23: extrait de [T4], recherche d'une machine en utilisant la Transforme de Fourier Discrete afin d'obtenir les inductances et fonctions de bobinage des machines fictives *84*
Figure 24: représentation de l'onduleur à trois bras par un cube en faisant apparaître par projection les hexagones "classiques" de Figure 10 (extrait de [T1]) *88*
Figure 25: tension comportant harmonique 1 et 3 permettant d'optimiser l'utilisation du bus continu *90*
Figure 26: tension et force électromotrice dans chaque machine fictive *90*
Figure 27: force électromotrice optimale pour un point de fonctionnement ne comportant que des harmoniques 1 et 3. ..... *90*
Figure 28: tension phase-neutre pour 3, 5 et 7 phases *91*
Figure 29: courant de BUS pour 3, 5 et 7 phases *91*
Figure 30: couple pour 3, 5 et 7 phases *91*
Figure 31: trajectoire sur la droite homopolaire *93*
Figure 32: trajectoire dans le plan secondaire de la machine pentaphasée *93*
Figure 33: trajectoire dans le plan principal de la machine pentaphasée *93*
Figure 34: Modélisation mettant en évidence les couplages mécaniques et électriques et donc la nécessité d'un critère de répartition du couple entre les différentes machines fictives (extrait de [CI23]) *97*
Figure 35: développement d'une commande en mode dégradé en utilisant le concept de fusible dans une REM (extrait de [CI18]). *98*
Figure 36: exemple demachine à plot *113*
Figure 37: exemple d'hydrolienne RIM 300kW *114*
Figure 38: caractéristiques du propulseur étudié, extrait de [CN6] *156*
Figure 39: comparaison des deux bobinages étudiés et des constantes de temps associées, extrait de [CN6] *156*
Figure 40: Comparaison des distributions de bobinage triphasé et pentaphasé, extrait de [CN7] *157*
Figure 41: Comparaison des fores électromotrices (a) ainsi que des couples électromagnétiques obtenus par spire des deux bobinages, extrait de [CN7] *157*

Figure 42: extrait de [CN7] *158*
Figure 43: représentation des bobinages d'une phase, extrait de [CI20] *158*
Figure 44: comparaison des couples de la machine à 7 phases avec le couple de la machine triphasée selon différentes commandes, extrait de [CI20] *159*
Figure 45: extrait de [CI20] *159*
Figure 46: forces électromotrices pour les deux machines, extrait de [CI20] *160*
Figure 47: extrait de [R10] *161*
Figure 48: comparaison des couples de la machine triphasé et de la machine pentaphasée pour différentes stratégies de commande (Sinus pur H1 ou bi-harmonique H1 et H3), extrait de [R10] *162*
Figure 49: bobinage à pas fractionnaire de la machine à 7 phases *163*
Figure 50: comparaison des couples *163*
Figure 51: comparaison des spectres des forces électromotrices (modification forte des ratios H9/H1 et H7/H3) *163*
Figure 52: comparaison des courants dans le cadre d'une commande MLI de même fréquence de porteuse *163*
Figure 53: configuration de la nouvelle machine qui ne diffère de la machine triphasée d'origine que par le nombre de pôles (58 pôles au lieu de 60) et le nombre d'encoches (180 encoches au lieu de 216). Le nombre d'encoches par pôle et par phase est de 18/29 en pentaphasé au lieu 6/5 en triphasé, extrait de 26[R15] *164*
Figure 54: caractéristiques de la machine triphasée de référence, extrait de 26[R15] *164*
Figure 55: configurations d'aimants étudiés, extrait de [R15] *164*
Figure 56: comparaison des forces électromotrices et de leur premier harmonique associé extrait de [R15] *165*
Figure 57: comparaison des couples en fonction de la couche d'aimant (optimisée ou radiale) et en fonction de la nature des courants statoriques imposés (sinusoidaux purs ou comportant les harmoniques 1 et 3), extrait de [R15] *166*
Figure 58: démarche de conception proposée dans la thèse de Franck Scuiller (extrait de [T4]) *167*
Figure 59: représentation de la machine axiale de type N-N *170*
Figure 60: maillage d'un douzième de la machine à 6 pôles *170*
Figure 61: force électromotrice et flux associé *171*
Figure 62: banc expérimental (extrait de [CI19]) *171*
Figure 63: stator (extrait de [CI19]) *172*
Figure 64: un rotor (extrait de [CI19]) *172*
Figure 65: représentation de l'amplitude du champ magnétique sous un pôle (extrait de [CI19]) *172*
Figure 66: comparaison entre fem expérimentale et calculée (extrait de [CI19]) *172*
Figure 67: comparaison couplé de détente expérimental et calculé (extrait de [CI19]) *172*
Figure 68: comparaison couples de détente calculés avec ou sans décalage des rotors (extrait de [CI19]) *172*
Figure 69: mise en évidence de la présence de couple pulsatoire en mode dégradé sans modification de commande (DM1) par rapport au mode normal (NM) en comparaison avec l'approche proposée (DM2) (extrait [CI23]) *173*
Figure 70: spectres des pulsations de couples de la Figure 77 (extrait [CI23]) *173*
Figure 71: structure de commande (extrait de [CI23]) *174*
Figure 72: représentation classique de la structure de commande (extrait de [R14]) *174*
Figure 73: force électromotrice et courant en mode normal (extrait de [R14]) *175*
Figure 74: couples mesurés en mode normal (T1), dégradé (T2) sans modification de commande, dégradé avec commande améliorée et courants non sinusoidaux (T3) (extrait de [R14]) *175*
Figure 75: nouveaux courants des machines fictives en mode dégradé et commande optimisée (extrait de [R14]) *175*
Figure 76: nouveaux courants dans les phases réelles en mode dégradé et commande optimisée (extrait de [R14]) *175*
Figure 77: comparaison dans le cas « deux phases ouvertes » des pulsations de couples dans le cas d'une fem rectangulaire avec (rond rouge) ou sans (carre bleu) commande améliorée en prenant comme référence le résultat (losange) obtenu avec le prototype commandé *176*
Figure 78: spectres des pulsations de couples de la Figure 77 (extrait de [R13]) *176*

Cursus universitaire et professionnel/Résumé des activités

État civil-Formation-Emplois occupés :

Etat civil

Nom :	SEMAIL
Prénoms :	ERIC, PASCAL
Date et lieu de naissance :	11/01/62 à LENS (62)
Nationalité :	française
Situation de famille :	marié, 2 enfants
Adresse professionnelle:	ENSAM, 8 bd Louis XIV 59046 LILLE
Laboratoire :	Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de LILLE (L2EP), http://l2ep.univ-lille1.fr/
Tél professionnel :	03.20.62.15.61.
Courrier électronique/site :	eric.semail@lille.ensam.fr , http://eric.semail.free.fr/

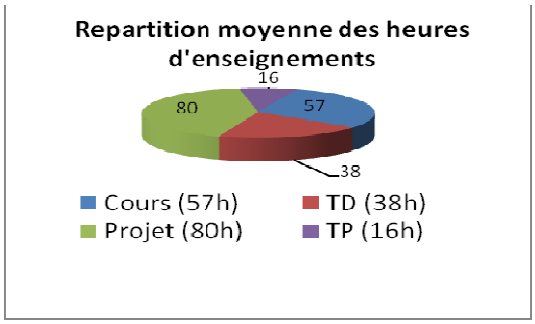
Formation

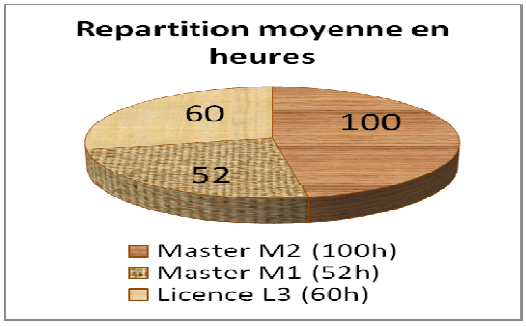
1979-1983	Baccalauréat Scientifique (C), Classes préparatoires Mathématiques (M'), Licence Sciences Physiques (USTL), Admission Ecole Normale Supérieure de Cachan
1983-86 :	Licence EEA, Maitrise EEA, Agrégation de Sciences Physiques, option Physique Appliquée, rang : 3ème.
1986-87 :	D.E.A. de systèmes électrotechniques de Paris mention Bien
Juin 2000	Thèse de doctorat à l'U.S.T.L.au L2EP. Spécialité: Génie Électrique. Mention très honorable et félicitations du jury.

Emplois occupés :

1983-1987	Elève-professeur, ENS Cachan
1988-2001	Professeur agrégé à l'USTL
2001-2008	Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers – groupe PARISTECH, ENSAM centre de Lille. http://www.ensam.fr/

Activités d'enseignement récentes et actuelles:





Voici ci-dessous (1>, 2> 3>) une présentation globale de mes enseignements en considérant les appellations de type LMD. Je précise ensuite (4> et 5>) les projets encadrés ainsi que les éléments qui ont requis un investissement temporel conséquent.

1. Niveau Master 2ieme année (M2) ou troisième année élève-ingénieur

Fourchette de 80 h à 120 h selon année

- Depuis 2004, dans le thème d'expertise « Ingénierie des véhicules de Transport Terrestre » de 3ieme année à l'**ENSAM** **:** 50 h à 100 h réparties environ en 16h cours et le reste en encadrement de projets d'expertise;
- Depuis 2004, dans le **Master Recherche E2D2** « Energie Electrique et Développement Durable » de l'**USTL** (Université des Sciences et Technologies de LILLE) : 8h de cours sur les systèmes polyphasés dans l'unité **"Systèmes électriques pour véhicules du futur"** (polycopié en anglais) et 2 h dans le moule en anglais sur « ***Sustainable development and more electric ships. How to reduce the consumption ?***»;
- Depuis 2002, dans le **Master Pro « GR2E» de l'USTL**: 8h de cours sur la modélisation des réseaux électriques au sein des navires à propulsion électrique ;
- Depuis 2003, dans l'unité de troisième année **VAGE** (en Voie Approfondissement Génie Energétique), à **l'Ecole Navale** à Brest, 10h de cours sur la thématique du Génie Electrique dans les navires et en 2003, lors de la première intervention, création des Travaux Dirigés (8h) associés.

2. Niveau Master 1ere année (M1) à l'ENSAM

- 8 h Cours et 8 h de travaux dirigés sur Transmission de Puissance Electrique (variation de vitesse des machines électriques) ;

- Encadrement de projet(s) de 2^{ieme} année de l'ENSAM ;

3. Niveau licence 3 eme année (L3) à l'ENSAM:

- 15 h de cours et 22h de TD sur les fondements de la gestion de l'Energie Electrique (réseaux, machines, circuits magnétiques, électronique de puissance) ;
- 16 h dans l'unité Capacitaire « Conception préliminaire et détaillée » sur la démarche de conduite d'un projet en prenant l'exemple du Prédimensionnement d'un alternateur au sein d'un navire, alternateur entrainé via un système à engrenage par un moteur thermique dont les étudiants voient les prédimensionnements avec mes collègues thermicien et mécanicien ;

Il est à noter que les cours font l'objet d'un polycopié disponible sur l'intranet de l'ENSAM sur lequel les étudiants peuvent également trouver les examens corrigés des années précédentes ainsi que des supports (animations, exercices corrigés et cours complémentaires en ligne)

Globalement la charge d'enseignement devant étudiants représente de 192h à 230h selon les années.

4. Détail de mon investissement dans les activités d'enseignement à l'ENSAM

Depuis ma nomination en 2001 en tant que Maitre de Conférences à l'ENSAM voici quelques éléments qui détaillent mon activité :

- 2001-2002 :
  - rédaction, mise au point de 6 nouveaux TP sur 10, achat de matériel correspondant;
- 2002-2003 :
  - rédaction de nouveaux TD et de **cours de 1ere année (L3)**, gestion de la salle de TP et des 7 vacataires assurant à présent une partie des TP ;
- 2003-2004 :
  - poursuite de la structuration des TD et gestion de la salle de TP;
  - participation à l'élaboration de Projet de première année d'Initiation à la Technologie commun aux 8 centres ENSAM : test et implantation sur site d'une éolienne de 5 kW ;
  - pilote d'un projet de deuxième année, année M1, (« actionneur rotatif à double-genouillère pour soupape électromagnétique ») ;

- Participation forte à l'élaboration des nouveaux programmes de Génie Electrique « Courants Forts » dans le cadre de la réforme pédagogique de l'ENSAM avec pour effet une répartition des heures de première année sur les deux premières années avec une refonte associée des programmes.

- 2004-2005 :
  - mise en place de la réforme pour l'année L3 : restructuration des cours, TP et TD avec deux collègues ;
  - pilote de deux projets de **deuxième année, année M1**, (« conception et fabrication d'une machine électrique » et « commande d'actionneur linéaire ») ;
- 2005-2006 :
  - mise en place de la réforme pour l'année M1 avec le nouveau module Transmission de Puissance Electrique : rédaction d'un nouveau cours et de 4 TD (variation de vitesse et économie d'énergie). J'ai mis au point (achat de matériel, test et rédaction) avec un collègue deux nouveaux TP : un TP « simulation » « Matlab Simulink » sur la machine synchrone ainsi qu'un banc de variation de vitesse avec machine asynchrone (Contrôle vectoriel et/ou scalaire avec/ou sans capteur piloté avec paramétrage par ordinateur) ;
  - encadrement d'un projet de troisième année (contractualisation avec la société MECALECTRO)
  - encadrement d'un étudiant de l'Ecole d'Ingénieur de Meknes (Maroc) sur l'étude d'une machine synchrone de microturbine (modélisation d'un couple pulsatoire et solutionnement)
- 2006-2007 :
  - Définition et achat de matériel pour l'élaboration d'un deuxième banc de TP expérimental de variation de vitesse de machine synchrone autopilotée ;
  - encadrement d'un projet de troisième année (contractualisation avec la société VALEO)
- 2007-2008 :
  - mise en place avec un collègue du deuxième banc de TP expérimental de variation de vitesse
  - encadrement d'un projet de troisième année à Eindhoven aux Pays Bas « Conception d'un moteur roue »

- encadrement d'un projet de troisième année (contractualisation avec la société VALEO)

5. Détail de mon investissement dans les activités d'enseignement hors étudiants ENSAM

Les activités hors ENSAM sont liées en général à des relations établies dans le cadre des activités Recherche. C'est le cas pour le Master-Pro GR2E à l'USTL ou les enseignements VAGE à l'Ecole Navale (co-encadrement de deux doctorants à l'IRENav, l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale).

Un séminaire (**12 h)** en **DEA** a été fait au Laboratoire LES en **Tunisie** : 4 h cours sur le formalisme REM-SMC (Représentation Energétique Macroscopique-Structure Maximale de Commande) ; 8 H sur l'application de la REM et du formalisme vectoriel aux machines polyphasées et à l'étude et la commande des onduleurs de tension.

Outre les enseignements « traditionnels », j'ai encadré :

- ✓ chaque année de 2001 à 2007 un ou deux mini-projets « simulation » de MasterPro (20h),
- ✓ en 2003-2004 deux élèves officiers de l'Ecole Navale sur la modélisation d'un navire à propulsion électrique pour leur stage de fin d'étude (3 mois)
- ✓ en 2004-2005 un étudiant roumain sur la modélisation d'un générateur à 5 phases (3 mois).
- ✓ En 2004-2005, encadrement d'un étudiant de Master-Pro qui a fait son stage à l'Université de Liverpool avec le professeur E. Levi avec lequel une publication a été réalisée [CI15]
- ✓ En 2007, encadrement d'un étudiant chinois encadrement « Bachelor » dans le cadre des échanges avec une université chinoise (3 mois);
- ✓ En 2008 un élève officier de l'Ecole Navale sur « commande vectorielle auto adaptative aux pannes d'une machine pentaphasée » pour son stage de fin d'étude (3 mois)

Responsabilités pédagogiques, administratives et collectives

- ✓ Membre de la commission de spécialistes de l'Université des Sciences et Technologies de LILLE de 2004 à 2006.
- ✓ Membre de la commission de spécialistes de l'ENSAM de 2003 à 2004 puis à partir de 2006.
- ✓ Pour l'année 2006-2007, mon collègue S. Clenet bénéficiant d'un CRCT, j'ai assuré le rôle de correspondant entre l'Institut Carnot Arts et Métiers et mon laboratoire L2EP ainsi qu'entre l'école doctorale de l'ENSAM et le L2EP notamment pour la préparation de l'évaluation quadriennale de l'AERES.

- ✓ **Responsable adjoint du département FISE depuis 2006 (Fluide et Système Energétique) de l'ENSAM** et membre du Comité d'Organisation d'Harmonisation Pédagogique (**COHP)**. Le COHP est un organe permettant de réaliser des propositions sur la pédagogie.
- ✓ **Responsable pédagogique de l'unité d'Enseignement Disciplinaire « Courants Forts » (70h) de 2004 à 2008** (sauf pour 2006-2007 car je bénéficiais d'un congé thématique de six mois)

  Quatre permanents et 5 à 7 vacataires interviennent dans cette unité qui comprend l'enseignement des réseaux électriques, des circuits magnétiques, des machines électriques, la conversion électrothermique à induction ainsi que les bases sur les capteurs avec le traitement électronique associé. Outre les aspects de programmation temporelle des séquences ainsi que les relations avec les étudiants, la collecte, l'harmonisation et la synthèse des notes sont réalisées. J'opère également les demandes d'équipement afin de remplacer ou de moderniser le matériel de TP.
- ✓ **Co-responsabiblité pédagogique de l'option de Troisième Année « Ingénierie des véhicules de Transport Terrestre » de l'ENSAM depuis 2005**

  Suite à la modification de la répartition des étudiants de troisième année entre les 8 centres ENSAM, j'ai proposé en 2005, avec mon collègue co-animateur Jacques Charley, une modification de l'offre pédagogique de l'unité d'expertise **« Ingénierie des véhicules de Transport Terrestre »** qui comprend 150 h. Cette nouvelle offre permet de réaliser des synergies en proposant des interventions communes à d'autres étudiants. Un parcours différencié est également proposé à l'étudiant en considérant des sous-modules. Après vœux des étudiants, je définis 8 sous-groupes différents permettant une modulation de l'enseignement. En troisième année, les enseignements de spécialité font intervenir de nombreux intervenants extérieurs, notamment industriels. Une partie du travail consiste donc à organiser leur venue (emploi du temps, accueil, définition pédagogique de l'intervention) et à mettre en place les évaluations. Je gère pour ma part à peu près 10 intervenants qui assurent 75 h. Autres éléments inhérents : mise en place site internet, organisation visites d'entreprise, coordination de suivi de séminaires et conférences dans le domaine des transports (liés notamment aux groupes professionnels des Arts et Métiers ou aux activités du Pole de Compétitivité I-Trans de la région Nord),

- ✓ **Responsable pédagogique national de la discipline EEA pour le réseau Arts et Métiers Paristech (ENSAM), 8 centres, à partir de 2006.**

  Arts et Métiers Paristech (ENSAM) a la particularité d'être constituée de 8 centres avec un

programme commun et une direction générale à Paris.

Pour l'organisation de la pédagogie, il existe au sein de chaque centre un correspondant dans chaque discipline et un responsable national de discipline. Ce dernier est chargé d'animer la pédagogie et d'assurer une cohérence globale des enseignements. Ainsi, depuis 2006 nous mettons en place des ressources pédagogiques communes (cours, banque d'exercices, de TP, banque de questions pour QCM, d'ouvrages pédagogiques) disponibles pour tous les enseignants des différents centres. Nous organisons pour ce faire avec l'aide d'informaticiens la mise en place de cours en ligne au sein de PARISTECH (http://graduateschool.paristech.org/), cours pour l'instant uniquement disponible sur l'intranet de l'ENSAM.

Synthèse chiffrée de la production et de l'encadrement scientifique :

	2001-05	2006-08		2001-05	2006-08
Master/DEA	1 (100%)	3 (50%, 100%, 100%) Soutenance en juin 2009 pour le dernier master	Revue internationale RI	11	4
Co-encadrement de thèses soutenues (et % associé)	1 (75%)	3 (50%, 25%, 50%) soutenance le 6 mai 2009 pour la troisième thèse	Revue nationale RP	0	1
Co-encadrement de thèses en cours		1 (25%)	Congrès international avec actes	17	20
Contrats	1	7	Congrès national avec actes	4	3
Ouvrages	1 chapitre	1 chapitre	Communications Nationales et pédagogiques	9	2
Reviewing de papier congres	16	14	Reviewing de papier revue	2	11

A l'instar des milieux financiers et boursiers, la communauté scientifique se dote d'outils d'analyse de performances pouvant mener à une analyse automatique de l'activité « scientifique ». Je présente les trois résultats « standards » concernant mon activité (avec donc également partiellement celle des co-auteurs) en utilisant trois bases de données différentes. La première utilisée par Publish-or-Perish mobilise la base de donnée « gratuite » associée au moteur de recherche « Google Scholar ». Les deux autres, IsiWeb et Scopus, sont liées à des bases de données « payantes ». L'intérêt de la première base est d'une part que le nombre de références prises en compte est plus large avec des références

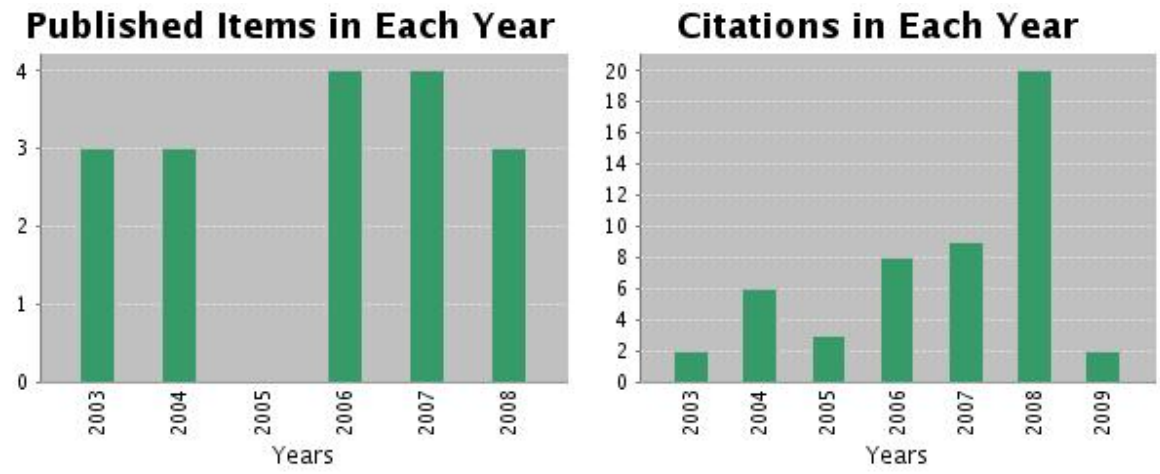
qui peuvent être vues et accessibles effectivement par tout acteur de la recherche. Par ailleurs, sont exploitées les potentialités informatiques permettant une analyse plus fine en calculant différents indicateurs en plus du h-index, ce dernier étant considéré comme notoirement insuffisant tout en ayant le mérite d'être plus universel (c'est le seul retenu par les deux autres bases de données (IsiWeb et Scopus)).

Bibliométrie Publish-or-Perish (Base de données Google Scholar) pour articles parus entre 2000 et 2009 (mars 2009)

Tableau 1: extrait des résultats de Publish-or-Perish

Papers:	43	Cites/paper:	4.65	**h-index:**	**8**	hI,norm:	5
Citations:	200	Cites/author:	77.86	g-index:	12	AWCR:	29,98
Years:	10	Papers/author:	14,57	hc-index:	6	AW-index:	5.48
Cites/year:	20	Authors/paper:	3.58	hI-index:	2.78	AWCRpA:	10.75

Bibliométrie ISI Web (Base de données Web of Science) Mars 2009



Références trouvées : 17 ; Somme des citations : 50 ; Moyenne des citations : 2.94 ; h_index : 4

Bibliométrie Scopus (Base de données Scopus) Mars 2009

Références trouvées : 25 ; h_index : 5

Activités collaboratives : participation à l'organisation de manifestations scientifiques, à des comités de lecture, expertise et chairman, relations internationales

- **Participation à l'organisation de manifestations scientifiques**

  [M1] Journées de l'école d'été, « Formalismes Graphiques de Modélisation et de Commande de Systèmes Electromécaniques», Lille, 11 au 13 juillet 2005 ;

  [M2] *International Workshop "Modelling and control of electrical systems »,* Lille, 13 - 14 November 2006;

  [M3] 5ieme Conférence européenne sur les méthodes numériques en électromagnétisme Numelec du 29 novembre au 1er décembre 2006 à Lille ;

  [M4] Journées du Club EEA à Lille SYSTEMES ELECTRIQUES POUR VEHICULES DU FUTUR du 11 et 12 mars 2009.

- Chairman à ICEM06 *(« IEEE Congress on Electrical Machines* »)Rapporteur en 2006 de la thèse de Master of Science (pp122) de DENPAN ZHU (« Vector Control of multiphase permanent magnet synchronous machine » de l'université de Laval (Canada),
- Rapporteur en 2008 de la thèse de Master of Science (pp162) de RUBAN IVANKOVIC (Etude comparative de redresseurs pour l'augmentation des performances des systèmes de génération d'automobile utilisant un alternateur à rotor à griffes) de l'université de Laval (Canada),
- Expertise de dossier de « Subvention à la découverte » du gouvernement canadien en 2006.
- Referee au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) en 2007.
- ***Reviewing pour revue internationale :*** **18 de 2001 à 2009**
  - ✓ 1 *IEEE Trans. on Power Electronics* en 2002 ;
  - ✓ 1 *IEEE Trans. on Power Electronics* en 2005 ;
  - ✓ 1 RIGE (Revue Internationale de Génie Electrique) en 2005;
  - ✓ 1 *IEEE Trans on Industrial Electronics en* 2006 ;
  - ✓ 3 RIGE (Revue Internationale de Génie Electrique) en 2006 ;
  - ✓ 4 *IEEE Trans on Industrial Electronics en* 2007 ;
  - ✓ 2 EPJAP (European Physical Journal Applied Physics) en 2007 ;
  - ✓ 2 *IEEE Trans on Industrial Electronics en* 2008 ;
  - ✓ 3 *IEEE Trans on Industrial Electronics en* 2009.

- ***Reviewing pour congrès international :*** **30 de 2001 à 2009**
  - ✓ PESC2004 (« IEEE Power Electronics Specialists Conference ») : 12 papiers
  - ✓ IEMDC05 (« IEEE Congress on Machines Drives and Control ») : 4 papiers
  - ✓ IEMDC07 (« IEEE Congress on Machines Drives and Control ») : 4 papiers
  - ✓ VPPC08 (« IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference ») : 4 papiers
  - ✓ ICIT 2009 (International Conference on Industrial Technology) : 1 papier
  - ✓ EPE2009 (European Power Electronic Congress) : 5 papiers

- ***Membre de jury de thèses (en dehors des trois thèses co-encadrées):***
  - ✓ *Thèse de Nadia MOKHTARI-MADANI, « Commande à structure variable d'une machine synchrone double étoile alimentée par deux onduleurs MLI : Modélisation dynamique, alimentation et validation expérimentale », Thèse de doctorat de l Université de Nantes - Ecole Doctorale STIM 36, soutenue le 8 décembre 2004.*
  - ✓ *Thèse de Robert Dehault, «Modélisation dynamique, commande et conception de machines pentaphasées alimentées par des onduleurs MLI » le 24 juin 2005, Thèse de doctorat de l Université de Nantes - Ecole Doctorale STIM 366*

- **Invitations à l'étranger**
  - ✓ Présentation des travaux scientifiques à l'université de Liverpool en mai 2007 (invitation du professeur Emil Levi)
  - ✓ Présentation des travaux scientifiques à l'université d'Eindhoven en juin 2007 (invitation de l'Associate Professor Elena Lomonova)

Activités d'encadrement de recherche et de transfert/valorisation depuis 2001

6. Encadrement scientifique

Thèses soutenues (comme co-encadrant) :

- Thèse en décembre 2003 (**75%** ; directeur JP Hautier 25%) de Xavier Kestelyn, "Modélisation vectorielle multi-machines pour la commande des ensembles, convertisseurs-machines polyphasés", USTL.

- Thèse en décembre 2006 (**50%** ; directeur F Piriou 50%) de Fabrice Locment, « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé », USTL.
- Thèse en décembre 2006 (**25%** ; directeur S Clénet 20%, JF Charpentier 55%) de Franck Scuiller, « Développement d'outils de conception de machines polyphasées à aimants permanents utilisant l'approche multimachine », ENSAM
- Thèse en mai 2009 (**50%** ; directeur A. Bouscayrol) d'Antoine Bruyère, « Modélisation et Commande d'un alterno-demarreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride », ENSAM

Thèses non soutenues (comme co-directeur) :

- Thèse débutée janvier 2006 par L. Drouen coencadrée par J-F Charpentier, E. Semail, S. Clénet (55%, **25%**, 20%) sur l'« Etude de machines électriques innovantes associées à des hélices marines »

On notera également une collaboration naissante depuis 2007 avec l'Université Libre de Bruxelles (ULB) avec le professeur Johan Gyselinck dans le cadre de la thèse de Fabien Meinguet. Une publication en commun a été réalisée [CI33]. C'est l'aspect Sureté, Fiabilité et Fonctionnement en mode dégradé des machines polyphasées qui constitue l'axe de collaboration.

Masters de recherche :

- DEA en 2002 (100%) : Arnaud Charlier, « Modélisation Numérique de Machines Polyphasées »
- Master en 2004-2005 (50%) : Yvan Crevits, «Caractérisation et commande d'un entrainement pentaphasé en mode dégradé »
- Master en 2006-2007 (100%) : Julien Pucci, « Gestion d'un alterno-démarreur pour véhicule lourd »
- Master en 2008-2009 (100%) : Li Lu, « Estimations de position pour commande vectorielle robuste de machines à aimants permanents à cinq ou sept phases »

7. Transfert et valorisation industrielles et/ou institutionnelles par activités contractuelles

Les thèses encadrées bénéficiant de moyens expérimentaux relativement lourds obtenus dans le cadre de divers appels à projets, une partie non anecdotique du temps et de l'énergie consiste en la gestion des sommes affectées (devis, achat, suivi de commande, etc). Par ailleurs, la gestion quotidienne nécessitant une certaine flexibilité, la réponse à des sollicitations industrielles apporte des financements exempts de contraintes temporelles (paiement d'un doctorant en attente de son financement officiel, achat de matériel en attendant les financements fléchés, etc). Néanmoins, on pourra noter que les sollicitations retenues ont préférentiellement concernées celles qui pouvaient également enrichir le spectre d'applications des entrainements polyphasé et/ou du domaine de la propulsion électrique maritime.

- Contrat en **2002** avec la société PECHINEY (**10,5 k€**) : «Faisabilité de contrôle électromagnétique de tension de bande en aluminium par induction » (rédacteur du rapport)
- Contrat en **2005** avec la société DSPACE (**15,1k€**) : "Interfaçage de mesure et de puissance pour commande de machine polyphasée " (rédacteur du rapport)
- Contrat en **2005-2006** avec la société MECALECTRO (**9k€**) : « Etude par simulation des paramètres d'influence de performance d'un Voice-Coil », (rédacteur du rapport)
- « Contrat » FUTURELEC 2 (L2EP/ Jeumont-Framatome/ EDF) de l'ordre de **52 k€** sur **2003-2005** pour le thème ARCHIMED, opération3.2, axe3.
- Contrat d'accompagnement (**49 k€ HT** sur **2005-2008**) avec la société VALEO: « Caractérisation et Commande d'un Ensemble Polyphasé Convertisseur Statique/Machine. » sur la thèse d'Antoine Bruyère.
- « Contrat » FUTURELEC4 (L2EP/VALEO/ANR/FEDER : sur **2005-2006**: **39 k€** ; **2006-2007** : **81 k€**) opération 6, relatif à la thèse d'Antoine Bruyère en collaboration avec VALEO.
- Expertise pour le compte de la société Italo-Suisse MSC (Mediterranean Shipping Company), dans le cadre d'une expertise judiciaire sur "Analyse et traitement de dysfonctionnements de réseau électrique de navires à propulsion électrique par moteur polyphasé " **2007-2009: 54 k€ HT** (rédacteur des rapports)
- Contrat avec la société belge PSI Control (**7k€**) en **2007-2008** : « Définition et étude de lois de commandes d'actionneurs électromagnétiques polyphasés de la famille « linero » (rédacteur du rapport)
- Expertise avec la société BUREAU-VERITAS en 2008 sur l' « Analyse d'avarie Alternateur de

navire méthanier » **7,2 k€ HT** (rédacteur du rapport);

Total des sommes gérées sur 2002-2008 (investissement/fonctionnement): de l'ordre de 293 k€

Activités d'enseignements et de recherche avant 2001

8. Activités d'enseignements en tant que PRAG

J'ai été recruté en 1988 à l'Université des Sciences et Technologie de LILLE pour assurer la formation des Maitres en Génie Electrique. Une partie de mon enseignement a concerné la préparation aux concours externes du **CAPET de Génie Électrique** (options électronique ainsi qu'électrotechnique et énergie). J'intervenais notamment pour la partie «asservissements », avec des séances de cours et de travaux pratiques (135H en 1999/2000).

J'assurais également depuis 1988 un **cours de physique**. Dans un premier temps, il eut lieu dans le cadre de la première année de formation des élèves - professeurs de l'antenne lilloise du C.F.P.E.T. (Centre de Formation Pédagogique de l'Enseignement Technique) puis, dans un deuxième temps à partir de 1991 en licence Ingénierie Électrique (20H cours, 26 H T.D.), licence à laquelle j'ai contribué pour la définition des programmes au niveau national (habilitation).

Fournir les éléments de physique nécessaires à la compréhension des principaux phénomènes rencontrés en Génie Électrique est l'objectif du cours. Les exercices quant à eux, tirés pour la plupart de cas concrets, permettent à l'étudiant, dans les domaines de la Thermique, de la Mécanique et de l'Électromagnétisme des milieux matériels, de mieux concrétiser le lien qui existe entre Physique et Génie Électrique.

Sous l'impulsion de M. Séguier j'ai entrepris la rédaction d'un **ouvrage** dont je suis le seul auteur. Ce livre qui est paru en avril 1998 aux éditions Technique et Documentation s'intitule **Physique du Génie Électrique.** Ses 220 pages comprennent un cours et une trentaine d'exercices avec corrigé détaillé.

La part la plus importante (195 H en 1999/2000) de mon service s'effectuait en préparation à **l'Agrégation de Génie Électrique.** Dans le cadre de cette préparation qui avait ré-ouverte en 1988 à mon arrivée, l'accent était particulièrement mis sur les sujets pluridisciplinaires. Ainsi, l'épreuve orale

de « montage » de l'agrégation permettait la mise en œuvre conjointe des domaines suivants dont je dispensais l'enseignement :

- Électronique de puissance et modèles des machines électriques ;
- Éléments de métrologie (Captage de l'information et mise en forme) ;
- Filtrage analogique et numérique (synthèse de filtres et usage de logiciels « industriels » divers, adaptés aux composants : « Maxim », « microcontrôleur Motorola HC16 »,…) ;
- Traitement numérique de l'information (CAN ; CNA ; transmission codée de l'information) ;
- Automatique linéaire (asservissements continus et échantillonnés) et non linéaire :
- Synthèse et mise en œuvre d'asservissements soit par réalisation de cartes élémentaires d'électronique analogique soit à partir d'une interface numérique et d'un PC. Les systèmes asservis mis en œuvre pratiquement étaient soit de type courants faibles (mise en œuvre par exemple de composants spécifiques du type Boucle à verrouillage de phase, MF10, AD2S100, etc) soit de type courants forts (alimentation de tension par pont à thyristors ; Alimentation PFC, asservissements de couple et de vitesse de machines électriques à courant continu, synchrone et asynchrone, etc) ;

Cours, travaux dirigés (correction d'extraits de sujets d'agrégation) et séances de préparations à l'« épreuve pédagogique » trouvaient leur prolongement lors des « montages » au cours desquels l'étudiant mettait au point en quelque sorte une séance de travaux pratiques.

- Co-responsable avec mon collègue Jean-François Sergent de la préparation à l'agrégation de Génie Électrique à l'USTL. Je m'occupais avec lui de la gestion de l'emploi du temps, de l'examen des dossiers ainsi que de la correspondance avec les candidats.
- Membre du jury de CAPET Génie Électrique interne option Électrotechnique et Énergie de 1992 à 1998 ;
- Membre du jury d'admission PLC2 (Professeur de Lycée Certifié) et de la commission d'admission en première année I.U.F.M. de 1992 à 1998 ;

Le contexte au sein duquel s'effectuait cet enseignement avait évolué de façon notable depuis 1988 et avait demandé des adaptations constantes de notre offre de formation concernant la préparation à l'agrégation.

[1] La création de l'agrégation interne, avec ses deux options fortement marquées[1], avait modifié le nombre de candidats au concours externe[2]. Pour conserver un nombre suffisant de candidats, nous avions été conduits à préparer également à l'agrégation interne. Une aide de la MAFPEN avait permis, pendant quelques années, de tenir compte partiellement de cette spécificité. Des modules d'été avaient également été organisés.

[2] Une deuxième évolution avait été également la création de deux options au concours externe avec néanmoins une différence notable par rapport au concours interne. En effet, la distinction entre électronique (courants faibles) et électrotechnique (courants forts) n'existe que pour deux épreuves (orales). Il faut en fait de fortes connaissances théoriques dans les deux domaines, courants forts et faibles. Le flux d'entrée à la préparation ne s'était donc guère trouvé modifié par la création de ces options. La prise en compte de ces deux options, à moyens constants, n'avait pu être que partielle (au niveau des montages).

9. Contexte particulier des activités de recherche avant 2001 en tant que PRAG

En 1988, j'ai choisi de privilégier une activité d'enseignement en prenant un poste d'agrégé en formation des maîtres et plus particulièrement pour la préparation à l'agrégation de Génie Électrique. Je me suis investi passionnément dans cette voie et n'envisageais pas la recherche en terme professionnel mais plutôt à titre "ludique". Après deux à trois années, j'ai commencé néanmoins à développer une activité de recherche modeste, toujours handicapé par un service très lourd (plus de 450h avec des heures complémentaires quasiment obligatoires étant donnés les manques de personnel). Je me suis inscrit en thèse pour formaliser le cadre de la recherche effectuée.

En 1998, j'ai pu me libérer de la charge des heures complémentaires pour retrouver un service normal de 384 heures. J'ai pu développer la partie recherche au L2EP pour mener à une soutenance de **thèse en juin 2000**

De la thématique originelle du sujet de thèse (« Étude d'un onduleur de courant en Modulation de Largeur d'Impulsions alimentant une machine asynchrone»), mon cheminement m'a conduit, de par ma formation théorique initiale, au développement d'outils vectoriels adaptés à l'étude des systèmes

[1] Il n'était pas demandé de connaissance en courants forts (électrotechnique et électronique de puissance) pour l'option électronique (courants faibles) et vice et versa..

[2] En effet, les enseignants certifiés constituaient une fraction importante de nos candidats. Ils disposent de connaissances technologiques et pratiques plus solides qu'un étudiant en fin de formation initiale. Ce dernier, s'il a une formation en physique suffisante, sera plutôt dirigé vers l'agrégation de physique appliquée.

polyphasés (titre de la thèse : *« Outils et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace »* sous la direction de C. Rombaut).

En l'année 2000, j'ai bénéficié d'une décharge pédagogique qui m'a permis de **débuter une activité de publication en terme de recherche.**

Nommé Maitre de Conférences au centre ENSAM de Lille en septembre 2001, j'ai pu développer l'axe de recherche qui s'était dégagé de ma thèse.

Intérêt et problématique du thème de recherche

Le transport de l'énergie électrique par des réseaux triphasés a conduit par le passé au développement de convertisseurs électromécaniques triphasés. Ces derniers ont bénéficié de l'essor des interrupteurs de puissance et de celui des composants de commande type Digital Signal Processor (DSP). Les performances de ces machines électriques triphasées associées à des onduleurs s'en sont trouvées accrues notamment dans le domaine de la vitesse variable.

Néanmoins des problèmes apparaissent tant au niveau de l'onduleur que de la machine lorsqu'on désire augmenter la puissance transmise. Les interrupteurs doivent en effet alors commuter des tensions et des courants d'amplitude plus élevée (coût unitaire plus élevé pour les modules et pollution électromagnétique accrue). Par ailleurs, à courant donné, l'augmentation de la puissance mène à des contraintes en tension (problème au niveau des isolants diélectriques) plus fortes pour la machine. Ce dernier effet de contrainte (une accélération du vieillissement des diélectriques) est d'autant plus accentué lorsque la machine est alimentée « classiquement » par un onduleur de tension fonctionnant en Modulation de Largeur d'Impulsions. Une piste classique pour la résolution de ces problèmes est celle, toute électronique, des convertisseurs multi-niveaux.

Un fractionnement de la puissance par augmentation du nombre de phases de la machine peut apparaître comme une solution alternative et/ou complémentaire. A puissance et courant donnés les contraintes en tension sont moindres. La multiplication du nombre de phases permet l'utilisation de modules d'électronique de puissance identiques de moindre coût unitaire (élément favorable en terme de coût de maintenance). De plus, ce type de structure polyphasée permet d'augmenter la tolérance aux pannes du convertisseur électromécanique. En fait, il s'agit de répartir les contraintes entre le convertisseur électromécanique et le convertisseur statique.

Un autre domaine concernant les machines polyphasées est celui des basses tensions (automobile par exemple). En effet, la présence de courants d'intensité très élevée nécessite en général une mise en parallèle [118] de nombreux interrupteurs qu'il peut être judicieux (pour des raisons de surdimensionnement par exemple) de répartir entre plus de 3 phases. Là encore, les machines polyphasées constituent une alternative économique d'autant qu'elles permettent de réduire les pulsations de couple et donc le bruit d'origine électromagnétique.

Enfin, le domaine des alternateurs grandes vitesses à entraînement direct (>20 000 tr/mn par exemple avec les turbines à gaz) concernent également les machines polyphasées puisque l'utilisation de redresseurs à MLI dont la fréquence fondamentale est supérieure à 1000Hz impliquent des contraintes fortes sur les interrupteurs avec nécessité là encore d'un fractionnement de la puissance.

Des machines polyphasées ont ainsi été développées industriellement dans différents domaines (marine, pétrochimie, avionique, automobile,…). Après une alimentation par commutateur de courant, c'est à présent l'alimentation par onduleur de tension commandé en Modulation de Largeur d'Impulsions qui suscite l'intérêt. Néanmoins ce type d'alimentation nécessite une approche plus fine des machines polyphasées du fait de l'effet important du couplage magnétique entre phases.

La problématique de recherche est l'étude et le développement **d'ensembles complets** comprenant le convertisseur statique, le convertisseur électromécanique polyphasé ainsi que la commande. En effet, l'adéquation entre la machine et le convertisseur est encore plus nécessaire que dans le cas d'une machine triphasée, la commande du convertisseur ne pouvant raisonnablement compenser certains défauts constructifs de la machine. Ainsi, un onduleur de tension qui alimente une machine polyphasée dont le bobinage est optimisé pour obtenir une force magnétomotrice sinusoidale va induire des courants parasites de forte amplitude dans la machine. Il est ainsi nécessaire de reprendre la conception du bobinage pour « désensibiliser » la machine.

L'adéquation du convertisseur électromécanique au convertisseur statique est recherchée **d'une part** en **agissant** sur les **paramètres constructifs de la machine** polyphasée afin de l'adapter le plus possible au convertisseur dont le caractère discret[3] impose des contraintes à la machine. **D'autre part**, on agit également sur les degrés de liberté offerts par la **commande du convertisseur** statique (choix des vecteurs tension activés) afin d'exploiter au mieux la machine polyphasée (réduction des courants parasites, marche dégradée…).

[3] l'approche aux valeurs moyennes est insuffisante pour caractériser les performances d'une machine polyphasée alimentéé par un convertisseur statique

C'est donc vers une approche qui allie simultanément la conception de machine à celle de commande de convertisseur qu'il faut se diriger.

Outils et Encadrements pour le développement de l'activité Recherche

Pour l'étude des systèmes polyphasés, il est a priori logique d'utiliser le formalisme matriciel (qui est au sens strict vectoriel [CI2][R4]). Néanmoins, ce dernier en privilégiant immédiatement une base de travail ne met pas en exergue les propriétés vectorielles intrinsèques des convertisseurs statiques et électromécaniques. C'est ce qui m'a amené à développer, lors de ma thèse, **un formalisme vectoriel** plus orienté sur l'utilisation d'êtres mathématiques vectoriels (morphisme, sous-espaces propres, produit scalaire, produit mixte, coordonnées barycentriques,…). Il permet une approche synthétique à la fois des machines polyphasées et des onduleurs multi-bras [R1]. La généralisation du concept de vecteurs d'espace aux onduleurs à n bras en est une des premières applications [R2].

La **thèse** de **Xavier Kestelyn**, amorcée début 2001, soutenue en décembre 2003 et que j'ai co-encadrée (à 75%), s'est intéressée d'une part à la **commande d'onduleurs n-bras de tension** avec synthèse d'algorithmes « rapides » [CI1]. D'autre part, y a été développé également le **concept de machines fictives**. Ce dernier est issu de l'application du formalisme vectoriel aux concepts Multimachines (développés au sein des GDR SDSE puis ME2MS [CD1], [R3], [R6],[R7] et **REM** (**R**eprésentation **E**nergétique **M**acroscopique [27] développée au sein du L2EP, [CN2], [R3], [CD6], [CD7]). Il s'agit du concept d'ensemble équivalent de machines fictives [CD2], [CD3], [CI3], [R5] bien connu pour la machine triphasée mais généralisé aux machines polyphasées[4].

Afin de valider **expérimentalement** ces différents concepts, une machine pentaphasée à aimants permanents a été réalisée. Sa commande et son alimentation s'opèrent à partir du banc Multimachines (piloté par carte Dspace) développé au L2EP. Les résultats expérimentaux corroborent la modélisation

[4] Ainsi une machine hexaphasée double étoile peut être considérée comme étant mathématiquement l'association de deux machines diphasées dont une seule produit du couple (dans la mesure où l'hypothèse du premier harmonique d'espace est adoptée). La représentation vectorielle que je propose de l'onduleur de tension à six bras connecté à la machine, permet de générer une commande adaptée qui "alimente" la seule machine susceptible de produire du couple. On évite ainsi des pertes Joule inutiles qui surviennent lorsque la machine non "productive" est alimentée.

[T2], [CI3] et ont fait l'objet de soumissions de papiers pour l'année 2004 ([CI10], [CI9]). Le concept Multi-Machines a été mis à profit pour commander la machine pentaphasée en mode dégradée [T2].

C'est en 2001-2002 que cette machine a été conçue. Une collaboration s'est instaurée à ce propos avec le LEEPCI (Université de Laval au Québec) qui s'intéresse également aux machines polyphasées. **Le stage de DEA de M. Charlier** s'inscrivait dans ce cadre. Son but était de mettre en évidence, à l'aide du concept Machines Fictives, l'effet de paramètres constructifs (bobinages et aimants) sur les performances globales d'une machine pentaphasée à aimants permanents. Une étude analytique et par calcul de champs a été réalisée à cette fin. **Les thèses débutées en 2003 ont continué dans cette voie : concevoir à l'aide du concept Machines Fictives** une machine polyphasée exploitant au mieux une alimentation par onduleur de tension, alimentation dont la commande permet d'exploiter les potentialités spécifiques des machines polyphasées (meilleur couple massique à taux d'ondulation de couple donné, fonctionnement en mode dégradé,…). C'est également à ce titre que je me suis impliqué (juin 2003) dans le CNRT[5] pour la conception d'un prototype de générateur polyphasé à entraînement direct pour éolienne.

Cette approche « système » a impliqué mon appartenance à deux équipes du L2EP (MECOSYEL : Modélisation, Étude et Conception des Systèmes Électromagnétiques et CEMASYC : Commande des Electromécanismes et systèmes Couplés).

Deux thèses soutenues en 2006 ont permis d'approfondir la connaissance des systèmes polyphasés :

- Thèse en décembre 2006 (50% ; directeur F Piriou 50%) de Fabrice Locment, « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé», USTL. Un prototype de machine à 7 phases à double rotor et à flux axial (Figure 1) a été conçu[6] (financement dans le cadre de FUTURELEC IV) et une commande vectorielle permettant d'obtenir une bonne qualité de couple en mode dégradé avec une ou deux phases en moins a été réalisée (voir animation téléchargeable sur http://eric.semail.free.fr/ rubrique Workshop). Cette commande suppose certaines particularités constructives de la machine. On montre ainsi que l'on est bien dans une problématique d'entrainement.

[5] Centre National de Recherche Technologique regroupant notamment le L2EP, Jeumont-Framatome et EDF
[6] Sa réalisation a été faite par la société **SELEM (selem@oricom.ca)** au Québec.

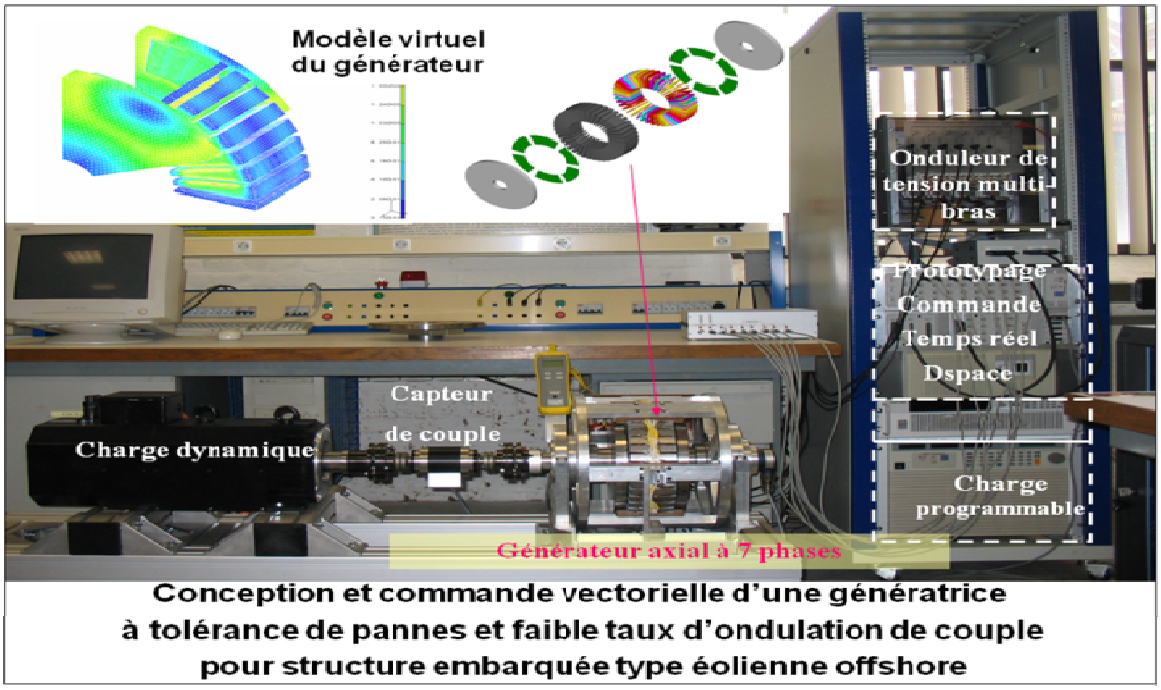


Figure 1: banc expérimental (thèse F Locment)

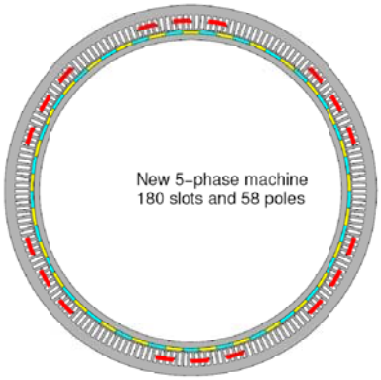


Figure 3: machine à faible couple pulsatoire (Thèse F. Sculiller)

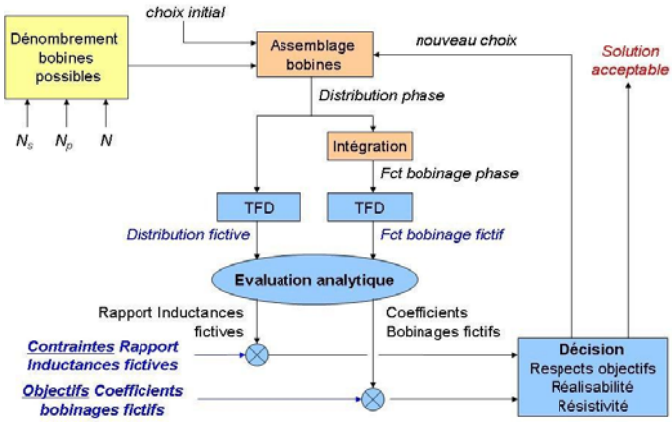


Figure 2: structure d'algorithmes pour la conception (Thèse F. Sculiller)

- Thèse en décembre 2006 (25% ; directeur S Clenet 20%, coencadrant à l'IRENav, JF Charpentier 55%) de Franck Sculiller, «Développement d'outils de conception de machines polyphasées à aimants permanents utilisant l'approche multimachine», ENSAM.

Cette thèse a permis de développer des algorithmes de conception de machines synchrones polyphasées permettant de vérifier les conditions d'une bonne alimentation de la machine.

- Thèse soutenue le 6 mai 2009 en collaboration avec VALEO (encadrement JM Dubus et JC Mipo) avec A. Bouscayrol (50%) en tant que directeur de thèse sur la « ***Caractérisation et commande d'un alterno-démarreur polyphasé à griffes ».*** Cette thèse s'est intéressée à la réalisation d'une part d'un prototype numérique en vue d'une optimisation, d'autre part à l'étude des différents modes de commande de l'alterno-démarreur. Cette thèse a permis d'examiner l'usage de l'approche Multimachine sur une machine qui ne vérifie que très approximativement les hypothèses de travail (effet de saturation, effet de saillance).

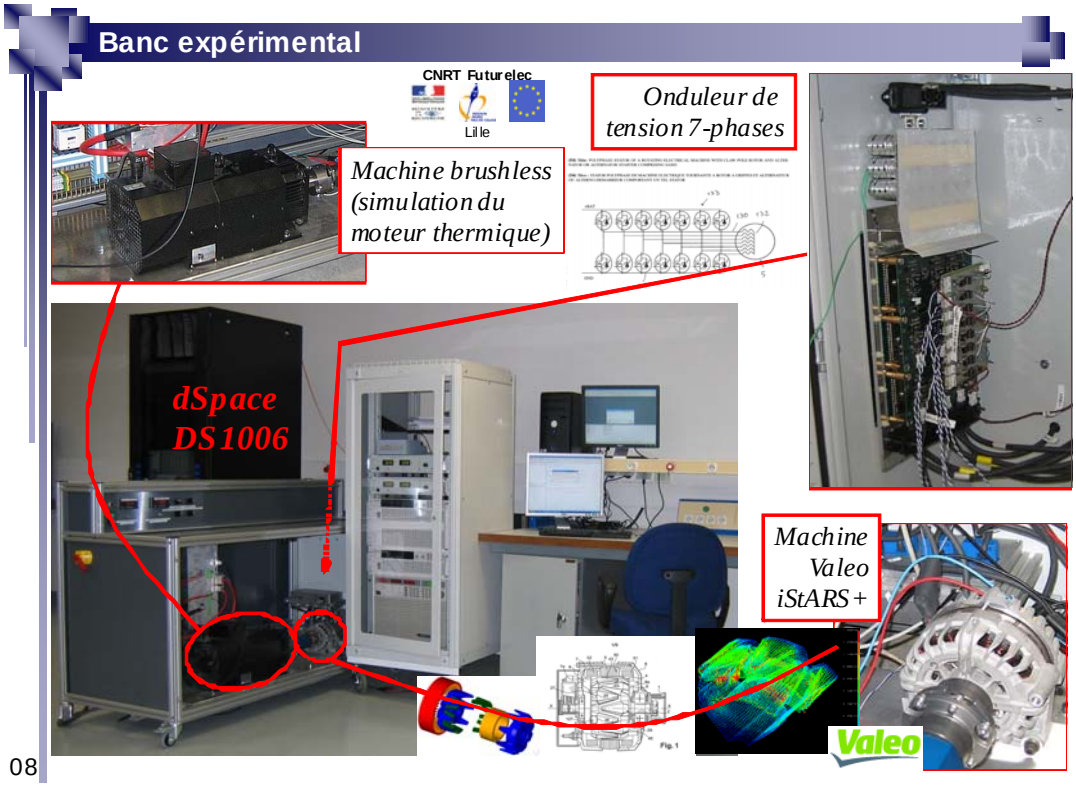


Figure 4: banc expérimental alterno-démarreur (thèse A Bruyere)

Actuellement, je participe au co-encadrement d'une thèse en cours :

- Thèse débutée en janvier 2006 par L. Drouen coencadrée par J-F Charpentier, E. Semail, S. Clenet (55% , 25%, 20%) concerne l'« Etude de machines électriques innovantes associées à des hélices marines ». Ces structures à entrainement direct sont propices à une utilisation de machines polyphasées.

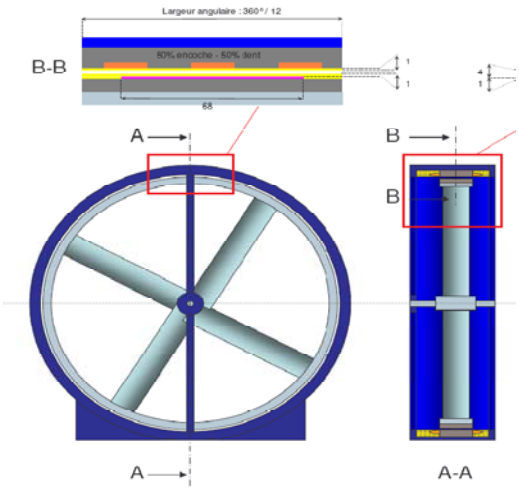


Figure 5: hélice réalisée à l'IRENav (Thèse L .Drouen)

Figure 6: prototype RIM (Thèse L. Drouen)

Collaborations

Le formalisme vectoriel développé génère des collaborations avec d'autres laboratoires français et étrangers.

Dans un premier temps, mon insertion (juste après la thèse) au sein de l'action Multimachines Multiconvertisseurs du GDR SDSE m'a amené à entamer des **collaborations avec deux laboratoires français** :

- le **GREEN** de Nancy par l'accueil d'un doctorant (Jean-Philippe Martin) pendant 15 jours au L2EP (en 2001) en vue d'appliquer le formalisme à la commande d'un onduleur à 10 bras (commande 2 ou 3 niveaux) [CD4], [CI4]
- le **GE44** de Saint Nazaire par l'application du formalisme à la commande en mode dégradée dans le DEA de E. Robert-Dehault [CI5] et ultérieurement par la rédaction d'un article à la RIGE comparant 3 approches émanant de 3 laboratoires (Green, Ge44 et L2EP) pour l'étude de la machine hexaphasée double étoile [R8]

Cette participation au groupe du GDR-SDSE a donné lieu à la rédaction d'articles communs relatifs à l'élaboration et à l'utilisation du formalisme SMM (Système Multimachines Multiconvertisseurs) [R6][R7].

Dans un deuxième temps, d'autres **collaborations** se développent avec **quatre autres laboratoires**:

- l'**IREnav** (Institut de Recherche de l'Ecole Navale à Brest, EA 3634) : je **coencadre (**avec Jean Frédéric Charpentier MdC à l'IREnav et S. Clenet PU à l'ENSAM**) un étudiant en doctorat** (L. Drouen) depuis janvier 2006. Ce co-encadrement fait suite à celui de Franck Scuiller dans les mêmes conditions. M Scuiller a soutenu sa thèse en décembre 2006 ;
- le laboratoire du professeur E. Levi à l'université de Liverpool : un stage du Master Pro GR2E (Christophe Damiens) et une publication en commun et une présentation des travaux à Liverpool en 2007 ;
- le LEEPCI a également accueilli Franck Scuiller pendant sa thèse et je suis intervenu en tant que rapporteur pour deux mémoires de Master of Science l'un sur les machines polyphasées et l'autre sur les alternateurs à griffes ;
- Le BEAMS de l'Université Libre de Bruxelles : quelques réunions d'échanges ont eu lieu. Fabien Meinguet, encadré par J. Gyselink, débute une thèse sur les machines polyphasées. Un article commun [CI33] a été présenté au congrès ICEM (International Congress on Electrical Machine) de 2008 ;

Communications et publications

On fournit ci-dessous une liste des publications auxquelles j'ai participé. Cette liste doit permettre d'avoir une vue synthétique des publications et de la cohérence de la recherches effectuée. On trouvera trois thèmes : celui des machines polyphasées, celui des formalismes et celui plus naissant de systèmes qu'on pourrait étiqueter « Développement Durable ». Les liens hypertexte http doivent permettre l'accès direct aux publications

Dans la mesure du possible, j'ai indiqué les liens hypertextes associés aux publications.

[T1] Semail E., « Outils et Méthodologie d'Etude des Systèmes Électriques Polyphasés. Généralisation de la Méthode des Vecteurs d'Espace », Thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 30 juin 2000, http://hal.archives-ouvertes.fr/.

[T2] Kestelyn X., "Modélisation vectorielle multi-machines pour la commande des ensembles, convertisseurs-machines polyphasés", Thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 04/12/03. https://iris.univ-lille1.fr/

[T3] Locment F., « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé», Thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, décembre 2006, https://iris.univ-lille1.fr/

[T4] Scuiller F. « Développement d'outils de conception de machines polyphasées à aimants permanents utilisant l'approche multimachine », Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, décembre 2006, http://hal.archives-ouvertes.fr/

[T5] Bruyere A., «Modélisation et Commande d'un alterno-demarreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride», 6 mai 2009, Thèse de l'ENSAM.

[T6] Drouen L., « Etude de machines électriques innovantes associées à des hélices marines », en cours

[M1] Charlier A., « Modélisation Numérique de Machines Polyphasées », DEA Master de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 2002

[M2] Crevits Y., «Caractérisation et commande d'un entrainement pentaphasé en mode dégradé », Master de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 2005

[M3] Pucci J., « Gestion d'un alterno-démarreur pour véhicule lourd », Master de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 2007

[M4] Lu L., « Estimations de position pour commande vectorielle robuste de machines à aimants permanents à cinq ou sept phases », Master de l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1, 2009

10. Publications dans des Revues Internationales

[R1] Semail E., Rombaut C., "Caractérisation vectorielle de convertisseurs statiques matriciels. Détermination des degrés de liberté d'une commande", RIGE, vol. 3, no. 3/2000, pp. 437 à 440.

[R2] Semail E., Rombaut C., "New Tools for Studying Voltage-Source Inverters", Power Engineering Review, IEEE , vol.22, no.3, pp.47-48, March 2002.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4312042&isnumber=21320

[R3] Bouscayrol A., Delarue P., Semail E., Hautier J.P., Verhille J. N., « Application de la macro-modélisation à la représentation énergétique d'un système de traction multimachine_ Représentation SMM du VAL 206 », RIGE , Volume 5, n°3-4/2002, pp 431-453.

[R4] Delarue P., Bouscayrol A., Semail E., "Generic control method of multileg voltage-source-converters for fast practical implementation," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.18, no.2, pp. 517-526, Mar 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1189602&isnumber=26670.

[R5] Semail E., Bouscayrol A., Hautier J.P., "Vectorial formalism for analysis and design of polyphase synchronous machines", EPJ AP (European Physical Journal-Applied Physics), vol. 22, no 3, pp. 207-220, 2003, DOI: 10.1051/epjap:2003034. http://www.epjap.org

[R6] Bouscayrol A., Davat B., De Fornel B., François B., Hautier J. P., Meibody-Tabar F., Monmasson E., Pietrzak-David M., Razik H., Semail E., Benkhoris M. F., "Control Structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", Mathematics and Computers in Simulation, vol. 63, no3-5, November 2003, pp. 261-270 (common paper of GE 44 St Nazaire, GREEN Nancy, L2EP Lille, LEEI Toulouse and LESiR-SATIE Cachan, according to the MMS project of the GDR-ME2MS, selected from ElectrIMACS'2002).http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=15384141

[R7] Bouscayrol A., Davat B., Escané P., De Fornel B., François B., Hadiouche D., Hautier J. P., Martin J. P., Meibody-Tabar F., Monmasson E., De Olivera V., Peña-Eguiluz R., Pierquin J., Pietrzak-David M., Razik H., Semail E., « Structures de commande des Systèmes Multi-machines Multi-convertisseurs », RIGE, Volume 6, n°3-4/2003, pp307-324.

[R8] Benkhoris M, Merabtene M, Meibody F., Davat B., Semail E., « Approches de modélisation de la Machine Synchrone Double Etoile alimentée par des onduleurs de tension en vue de la commande », RIGE, Volume 6, n° 5-6/2003, pp 579-608, ISBN : 2-7462-0800-8 http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=197362

[R9] Kestelyn X., Semail E., Hautier J. P., "Multi-phase System Supplied by SVM VSI: A New Fast Algorithm to Compute Duty Cycles", EPE Journal, vol. 14, no. 3, august 2004. http://www.epe-association.org/epe/index.php

[R10] Scuiller F., E. Semail, J.F. Charpentier, S. Clénet, "Comparison of conventional and unconventional 5-phase PM motor structures for naval application system", WSEAS 2004, Electroscience and Technology for Naval Engineering and All-electric ship, Greece, Athens, july 12-15, 2004, pp 365-370, ISSN 1790-031X.

[R11] Semail E., Meibody-Tabar F., Benkhoris M.F., Razik H., Pietrzak-David M., Monmasson E., Bouscayrol A., Davat B., Delarue Ph, de Fornel B., Hautier J.P., Louis J.P., Piefederici S., "Représentations SMM de machines polyphasées", RIGE, Revue Internationale de Génie Electrique, vol. 8 n°2/2005, pp. 221-239; ISSN : 1295-490X . http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16814090

[R12] Locment F., Semail E. and Piriou F., "Design and Study of a Multi-phase Axial-flux machine", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1427-1430, April 2006. http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/20/33780/01608484.pdf?arnumber=1608484

[R13] Semail E., Kestelyn X., Locment F., "Fault Tolerant Multiphase Electrical Drives: The Impact of Design", EPJ AP (European Physical Journal-Applied Physics), Vol 43, n°2, August 2008 pp. 159-163 DOI: 10.1051/epjap:2008057. http://www.epjap.org/index.php?option=toc&url=/articles/epjap/abs/first/contents/contents.html

[R14] Locment F., Semail E., Kestelyn X.," Vectorial Approach Based Control of a Seven-Phase Axial Flux Machine Designed for Fault Operation", IEEE Trans. on Industrial Electronics Vol 55, n°10, pp. 3682-3691, oct 2008. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4519973&isnumber=4636792

[R15] Scuiller F., Semail E., Charpentier J.F., « Multi-criteria based design approach of multiphase permanent magnet low speed synchronous machines", IET Trans. Electric Power Applications, March 2009, Vol 3, Issue 2, p. 102-110. doi: 10.1049/iet-epa:20080003. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4797497&isnumber=4797494

[R16] Crévits Y., Kestelyn X., Lemaire-Semail B., Semail E., « Modélisation causale pour la commande auto adaptée de machines alternatives triphasées en mode dégradé », EJEE European Journal of Electrical Engineering, Vol 13 n° 2 2010, pp. 1-42.

11. Publications dans des Revues à caractère pédagogique

[RP1] E. Semail, F. Meibody-Tabar, M.-F. Benkhoris, H. Razik, M. Pietrzak-David, E. Monmasson, A. Bouscayrol, B. Davat, P. Delarue, B. de Fornel, J.-P. Hautier, J.-P. Louis et S. Piefederici, « Machines polyphasées : de la modélisation multimachine à la commande », Volume 4, Hors-série 1 (2005), Avion et électricité, de l'électrotechnique haute performance, J3EA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes.
http://www.bibsciences.org/bibsup/j3ea/pub/page.php?cont=info&vol=vol4_HS1&art=12

12. Communications dans des Congrès internationaux avec actes

[CI1] Semail E., Rombaut C., « New method to calculate the conduction durations of the switches in a n-leg 2-level Voltage Source ", Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), August 2001, Austria, CDROM.

[CI2] Bouscayrol A., Delarue P., Semail E., François B., Hautier J.P., " Control Method for Multi-leg Voltage Source Inverters ", Proc. of EPE 2001 (European Power Electronics), 27-29 August, 2001, Graz, Austria, CDROM.

[CI3] Kestelyn X., Semail E., Hautier JP, "Vectorial Multi-machine Modeling for a Five-Phase Machine", Proc. of International Congress on Electrical Machine (ICEM), August 2002, Belgium, CDROM.

[CI4] Martin J. P., Semail E., Pierfederici S., Bouscayrol A., Meibody-Tabar F., Davat B., " Space Vector Control of 5-phase PMSM supplied by q H-bridge VSIs ", Proc. of ElectrIMACS 2002, Montreal, August 2002, CDROM

[CI5] Robert-Dehault E., Benkhoris M.F, Semail E., " Study of a 5-phase synchronous machine fed by PWM inverters under fault conditions ", Proc. of ICEM2002 , Brugge, August 2002, CDROM

[CI6] Bouscayrol A., Davat B., De Fornel B., François B., Hautier J. P., Meibody-Tabar F., Monmasson E., Pietrzak-David M., Monmasson E., Razik H., Semail E., Benkhoris M. F., "Control structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", Proc. of ElectrIMACS 2002, Montreal, August 2002, CDROM

[CI7] François B., Semail E., "Modeling and Control of a Three-Phase Neutral-Point-Clamped Inverter by Means of a Direct Space Vector Control of Line to Line Voltages Control structures for Multi-machine Multi-converter Systems with upstream coupling", Proc. of EPE-PEMC 2002, Cavtat & DubroVnik, September 2002, CDROM

[CI8] Kestelyn X., Semail E., Hautier JP., "Multiphase system supplied by PWM VSI. A new technic to compute the duty cycles", Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2003, France, CDROM.

[CI9] Semail E., Kestelyn X., Bouscayrol A., "Right harmonic spectrum for the back-electromotive force of an n-phase synchronous motor," *Industry Applications Conference, 2004.* Proc. of *39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.1, no., pp.-78, 3-7 Oct. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348390&isnumber=29649.

[CI10] Semail E., Kestelyn X., Bouscayrol A., "Sensitivity of a 5-phase brushless DC machine to the 7th harmonic of the back-electromotive force," Proc. of PESC 04, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004, vol.6, no., pp. 4564-4570 Vol.6, 20-25 June 2004,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1354807&isnumber=29758.

[CI11] Kestelyn X., Semail E., Loriol D., "Direct torque control of multi-phase permanent magnet synchronous motor drive: application to a five-phase," Proc. of *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.137-143, 15-15 May 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531332&isnumber=32672.

[CI12] Locment F., Semail E., Kestelyn X., "Optimum use of DC bus by fitting the back-electromotive force of a 7-phase permanent magnet synchronous machine," Proc. of EPE 2005, *European Conference Power Electronics and Applications, 2005*.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1665674&isnumber=34861.

[CI13] Semail E., Levi E., Bouscayrol A., Kestelyn X., "Multi-machine modelling of two series connected 5-phase synchronous machines: effect of harmonics on control," Proc. of EPE 2005, *European Conference Power Electronics and Applications, 2005*.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1665620&isnumber=34861.

[CI14] Bouscayrol A., Delarue P., De Fornel B., Hautier J.P., Meibody-Tabar F., Monmasson E.,Pietrzak-David M., Razik H., Semail E., Benkhoris M.F., "Control structures for multi-machine multi-converter systems with several couplings by criteria merging," Proc. of EPE 2005, *European Conference Power*

Electronics and Applications, 2005.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1665765&isnumber=34861.

[CI15] F. Scuiller, J.F. Charpentier, S. Clénet, E. Semail, "A Multi-phase Surface Mounted Permanent Magnet Design to Reduce Torque Ripples and Joule Losses", Proc. of AES 2005 (All-Electric Ship) 13-14 October 2005, Paris/Versailles, France, CD-ROM.

[CI16] Locment F., Henneron T., Semail E., Piriou F., "Using 3D-FEM for design of an axial flux seven-phase machine", Proc. of Symposium On Electric and Magnetic Fields (EMF2006), Aussois (France), June 19-22 2006.

[CI17] Crevits Y., Kestelyn X., Semail E., "Investigation on vector control of three-phase synchronous machines under supply fault condition," Proc. of Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on , pp. 439-444, May, 23rd - 26th, 2006, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1649812&isnumber=34594

[CI18] Locment F., Semail E., Kestelyn X., "A vector controlled axial flux seven-phase machine in fault operation", Proc. of ICEM'06, Chania, (Greece), Sept. 2006, CD-ROM

[CI19] Locment F., Semail E., Piriou F., "Soft Magnetic Composite Axial Flux Seven-Phase Machine", Proc. of ICEM'06, Chania, (Greece), Sept. 2006, CD-ROM

[CI20] Scuiller F., Charpentier J. F., Semail E., Clenet S., "A global design strategy for multi-phase machine applied to the design of a 7-phase fractional slot concentrated winding PM machine", Proc. of ICEM'06, Chania, (Greece), Sept. 2006, CD-ROM

[CI21] Vizireanu D., Kestelyn X., Brisset S., Brochet P., and Semail E., « Experimental Tests on a 9-phase Direct-Drive PM Axial-Flux Synchronous Generator", Proc. of ICEM2006 (International Congress on Electrical Machines), Sept. 2 – 5, 2006, Chania (Crete Island, Greece)

[CI22] Scuiller F., Charpentier J. F., Semail E., Clenet S., Letellier P., "Study Of Unconventional Designs Of Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machine To Increase The Torque Density For Pod Propulsion Application", Proc. of T-POD'06, Conference on Podded propulsion technological Advance, Brest, 3-5, october 2006, FRANCE

[CI23] Locment F., Semail E., Kestelyn X., Bouscayrol A., "Control of a Seven-phase Axial Flux Machine Designed for Fault Operation," *IEEE Industrial Electronics,* Proc. of *IECON 2006 - 32nd Annual*

Conference on , pp.1101-1107, 6-10 Nov. 2006,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4153159&isnumber=4152825.

[CI24] Barre P.J., Bouscayrol A., Delarue P., Dumetz E., Giraud F., Hautier J.P., Kestelyn, X., Lemaire-Semail B., Semail E., "Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions," *IEEE Industrial Electronics,* Proc. of *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on* , vol., no., pp.5276-5281, 6-10 Nov. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4153510&isnumber=4152825.

[CI25] Locment F., Bruyere A., Semail E., Kestelyn X., Bouscayrol A., Dubus J.M., "Comparison of 3-, 5- and 7-leg Voltage Source Inverters for low voltage applications," *Electric Machines & Drives Conference, 2007.* Proc. of *IEMDC '07. IEEE International*, vol.2, pp.1234-1239, 3-5 May 2007.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270826&isnumber=4270762.

[CI26] Kestelyn X., Locment F., Crevits Y., Semail E., "Easy-to-Implement Integral Numerical Simulation of Multi-phase Drives under Fault Supply Condition," *Electric Machines & Drives Conference, 2007.* Proc. of *IEMDC '07. IEEE International* , vol.2, no., pp.1131-1135, 3-5 May 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270809&isnumber=4270762.

[CI27] Scuiller F., Charpentier J.-F., Semail E., Clenet S., "Comparison of two 5-phase Permanent Magnet machine winding configurations. Application on naval propulsion specifications.," Electric Machines & Drives Conference, 2007. Proc. of IEMDC '07. IEEE International , vol.1, pp.34-39, 3-5 May 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270610&isnumber=4270600

[CI28] Drouen L., Charpentier J-F., Semail E., Clenet S., “Study of innovative electrical machines fitted to marine current turbines”, Proc. of OCEANS '07 (IEEE/OES Conference), 2007, 18-21 june, Aberdeen (Scotland), pp. 1 – 6.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4302284&isnumber=4302189

[CI29] Henneron T., Locment F., Semail E., Piriou F., “Predetermination of Currents and Field in Short-Circuit Voltage Operation for an Axial-Flux Permanent Magnet”, Proc. of CEFC 2008 (IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation) , Athens, 5-2008, http://www.cefc2008.gr/cefc2008/

[CI30] Drouen L., Charpentier J-F., Hauville F., Semail E., Clenet S., “A coupled electromagnetic / hydrodynamic model for the design of an integrated rim-driven naval propulsion system », Proc. of ElectrIMACS, 2008, 8-11 June, Quebec (Canada).

[CI31] Bruyere A., Semail E., Locment F., Bouscayrol A., Dubus J.M., Mipo J.C., "Identification of sensitive R-L parameters of a multiphase drive by a vector control," Proc. of *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* , pp.2523-2527, 15-19 June 2008.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4592320&isnumber=4591876,

[CI32] Bruyere A., Henneron T., Locment F., Semail E., Bouscayrol A., Dubus J.M., Mipo J.C., "Identification of a 7-phase claw-pole starter-alternator for a micro-hybrid automotive application", Proc. of ICEM 2008, (International Congress on Electrical Machines), Sept. 6-9, 2008, Vilamoura (Portugal),
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4800046&isnumber=4799813

[CI33] F. Meinguet, J. Gyselinck, E. Semail, "Enhanced Torque Control of a PMSM Supplied by a Four-Leg Voltage Source Inverter Using the Third Harmonic", Proc. of ICEM 2008, (International Congress on Electrical Machines), Sept. 6-9, 2008, Vilamoura (Portugal),
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4799868&isnumber=4799813

[CI34] Bruyere A., Semail E., Bouscayrol A., Locment F., Dubus J.M., Mipo J.C., "Modeling and control of a seven-phase claw-pole integrated starter alternator for micro-hybrid automotive applications," Proc. of *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE* , pp.1-6, 3-5 Sept. 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4677668&isnumber=4677399

[CI35] Drouen L., Charpentier J.F., Semail E., Clenet S., "Investigations on the performances of the electrical generator of a rim-driven marine current turbine", Proc. of ICOE 2008, 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), 15th – 17th October 2008, Brest, France

[CI36] Kestelyn X., Semail E., Crévits Y., "Generation of On-line Optimal Current References for Multi-phase Permanent Magnet Machines with Open-circuited Phases", Electric Machines & Drives Conference, 2009. Proc. of IEMDC '09. IEEE International , Floride, USA.

13. Communications dans des Congrès Nationaux avec actes

[CN1] Semail E., Amberg M., Rombaut C., « Onduleur de courant M.L.I. triphasé : prise en compte originale des non linéarités. », EPF 2000, Lille, novembre 2000, p 383 à p 388.

[CN2] Semail E., X. Kestelyn, "Modélisation multi-machines d'une machine synchrone polyphasée", EF'2001 (Electrotechnique du Futur), Nancy, France, 14-15 Novembre 2001.

[CN3] Semail E., Kestelyn X., Charlier A., « Sensibilité d'une machine polyphasée aux harmoniques spatiaux », EF'2003, Gif-sur-Yvette,Supelec, 9-10 décembre 2003, CD-ROM.

[CN4] Barre P-J., Bouscayrol A. , Delarue P., Dumetz E., Giraud F., Hautier J.P., Lemaire-Semail B., Kestelyn X., Semail E., « Commande par inversion pour entraînements électromécaniques, principe et limites », Conférence Internationale Francophone en Automatique (CIFA), Juin 2006, Bordeaux.

[CN5] Drouen L., Sculler F., Charpentier J-F, Semail E., Clenet S., « Modèles analytiques pour le pre-dimensionnement de machines a aimants a basse vitesse, grand diametre et grand entrefers », EF'2007, Toulouse, 6-7 septembre 2007 , CD-ROM.

[CN6] Scuiller F., Charpentier J-F, Semail E., Clenet S., «Comparaison de bobinages polyphasés de machines synchrones a aimants permanents pour un cahier des charges de propulseur naval », EF'2007, Toulouse, 6-7 septembre 2007 , CD-ROM.

14. Congrès et colloques divers

[CD1] A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, "Présentation SMM du VAL 206 ", GDR-SDSE Séminaire SMM'00, 5-6 Février, 2001, Actes des journées, Lille.

[CD2] E. Semail, A. Bouscayrol, J. P. Hautier, "Pseudo-multimachines et commande", GDR -SDSE Séminaire SMM'00, 5-6 Février, 2001, Actes des journées, Lille.

[CD3] E. Semail, X. Kestelyn, A. Bouscayrol, " Concept multimachine pour machines polyphasées ", GDR -SDSE Séminaire SMM'01, 25-26 Octobre, 2001, Actes des journées, Cachan.

[CD4] J. P. Martin, E. Semail, S. Pierfererici, A. Bouscayrol, F. Meibody-Tabar, B. Davat, " Commande de machines polyphasées basée sur une représentation vectorielle généralisée", GDR -SDSE Séminaire SMM'01, 25-26 Octobre, 2001, Actes des journées, Cachan.

[CD5] A. Bouscayrol, B. Davat, P. Escané, B. de Fornel, B. François, D. Hadiouche, J. P. Hautier, J. P. Martin,F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, V. de Olivera, R. Peña-Eguiluz, J. Pierquin, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, " Structures de Commande de Systemes Multimachines Multiconvertisseurs", GDR-SDSE, Décembre, 2001, Actes des journées, Lyon.

[CD6] Semail E., Kestelyn X., " Analyse des harmoniques des machines fictives : couplages électriques ", GDR -ME2MS, mars 2003, Séminaire SMM'03, Actes des journées, Saint Nazaire.

[CD7] Kestelyn X., Semail E., Hautier J.P., « Critères de commande pour machines polyphasées ", GDR -ME2MS, mars 2003, Séminaire SMM'03.

[CD8] E. Semail, F. Meibody-Tabar, M. F. Benkhoris, H. Razik, M. Pietrzak-David , E. Monmasson , A. Bouscayrol, B. Davat, Ph. Delarue, B. de Fornel, J. P. Hautier, J. P. Louis, S. Piefederici, « Machines polyphasées: de la modélisation Multimachine à la commande », Journées du club EEA 2004, « Avion et électricité », Cergy-Pontoise, 18-19 mars 2004, publié dans revue 3EI.

15. OUVRAGES

[O1] E. Semail, « Physique du Génie Electrique », Technique et Documentation, Lavoisier, 1998, pp 220.

[O2] E. Semail, J-P Louis, G. Feld, chapitre 4, « Propriétés vectorielles des systèmes électriques triphasés », traité "Modélisation des machines électriques", aux éditions Hermes, juillet 2004. URL : http://www.hermes-science.fr/fr/cdrom2007/pages/notices/2746209160.html

[O3] X. Kestelyn, E. Semail « Alimentation polyphasée par onduleur de tension », chapitre 8 du traité « Commande rapprochée de convertisseurs statiques » aux éditions Hermes,Traité EGEM , Série Génie Electrique, pp. 33, septembre 2009
http://www.lavoisier.fr/fr/livres/index.asp?texte=2746220550&select=isbn&from=Hermes

Préambule aux trois parties suivantes

La suite du mémoire se décompose en trois parties. Dans la première de ces parties est fournie une analyse des travaux effectués dans le domaine polyphasé en mettant l'accent sur les travaux au sein desquels je n'ai pas participé. Lorsque la référence à nos travaux est utilisée, l'objectif est d'éclairer ceux réalisés avec une autre approche.

La partie suivante cherche à exposer les différentes directions qu'ont empruntées nos travaux. C'est l'occasion donc de présenter les idées fortes qui nous ont guidés pendant la période 2000-2009 et qui proposent un éclairage et une méthodologie sensiblement différents des travaux présentés dans la partie précédente.

Enfin, la troisième partie consistera à projeter cette thématique des systèmes polyphasés dans un avenir plus ou moins éloigné en considérant différents scénarios temporels. Ces perspectives de thématiques peuvent être miennes mais d'autres, associées à des problématiques plus sociétales, se profilent.

Contexte de la recherche sur les entraînements électriques polyphasés

Ce paragraphe permettra d'introduire les entrainements électriques polyphasés afin de situer nos travaux dans le contexte international concernant le sujet.

Les machines électriques polyphasées

Définition(s) et remarques sur l'appellation machine électrique polyphasée

L'appellation de machine électrique polyphasée requiert en premier lieu une précision selon que l'on se place du côté de l'utilisateur de machine qui voit le nombre de fils qu'il faut pour l'alimenter, du côté du concepteur de la machine qui considère le nombre de bobines électriques que l'on installe et que l'on connecte entre elles ou enfin du point de vue du modélisateur « mathématicien » qui envisage le nombre de variables indépendantes (ou encore la dimension de l'espace vectoriel) qu'il est nécessaire de considérer pour décrire correctement la machine. Ces approches mènent parfois à des confusions mais se justifient toutes de leur point de vue.

La définition du nombre de phases par le nombre de fils qu'il faut pour l'alimenter est la plus simple. Elle a le mérite de mettre en évidence la contrainte de l'alimentation et les problèmes de fiabilité. Plus le nombre de fils pour alimenter une machine est élevé, plus la probabilité d'une panne d'un des modules d'alimentation est élevée et plus le coût l'est également. Bien entendu cette argumentation est à revoir si l'on considère non pas la machine mais l'entrainement complet, la connectique étant plus intégrée dans le processus de fabrication. ***Cette définition*** qui considère en quelque sorte la machine comme une boîte noire ***ne sera pas considérée*** dans la mesure où la notion de phase fait plutôt référence à la constitution interne de la machine électrique. ***Néanmoins, le nombre de fils de connexion sera toujours un point à considérer pour comparer des machines polyphasées.***

Une autre définition plus électrotechnicienne consiste à considérer le nombre de phases *n* comme ***le nombre de bobines électriques*** *n* ***qu'il faut alimenter***. Selon les connexions qui s'opéreront ensuite entre les *n* bobines, le nombre de fils pourra être différent de ce nombre de bobines. Ainsi une machine triphasée classique comporte au final trois bobines dont les extrémités sont ramenées sur six bornes de connexion. Les couplages étoile sans neutre sorti ou triangle permettent de ne connecter que trois fils alors que d'autres configurations nécessitent quatre ou six fils. Dans ces deux derniers cas, si la machine conserve l'adjectif qualificatif de triphasée, elle en perd pratiquement un de ses points forts à savoir le

nombre réduit à trois de fils d'alimentation. Ainsi on comprendra aisément qu'une machine diphasée au sens des électrotechniciens ne soit pas très développée car nécessitant 4 fils d'alimentation.

Cette définition est plus exigeante pour un utilisateur car elle demande une connaissance interne de la machine. Une machine alimentée par six fils pourra ainsi être une machine triphasée, une machine pentaphasée à neutre sorti ou une machine hexaphasée sans neutre sorti.

La confusion peut croitre si l'on pousse à l'extrême cette définition. En effet, une machine à *n* phases comporte *n* bobines. Chaque bobine est en fait réalisée en connectant entre elles des bobines plus élémentaires. Si le choix est de ne plus réaliser ces connexions mais d'alimenter chaque bobine[7], alors le nombre de phases augmente très vite de façon plus ou moins artificielle. Le terme artificiel fait référence à une complexité accrue simplement en changeant la valeur du nombre de phases mais non pas par l'augmentation du nombre de signaux électriques observables différents.

Ainsi, en considérant par exemple une machine «triphasée» bipolaire dont chaque bobine est réalisée par la connexion entre elles de deux bobines déphasées de 180° degré entre elles, on peut réaliser une machine que l'on pourrait appeler à six phases. Pourtant les phénomènes internes sont en fonctionnement normal, identiques en tout point à ceux d'une machine triphasée classique : seuls les cas tirant profit du passage de six à douze connexions justifient alors l'appellation de machines à six phases.

Un autre exemple de cas artificiel concerne les machines à *p* paires de pôles à bobinage à pas entier. Dans ce cas, on dispose sous chaque pôle des bobines et on répète tout simplement l'opération *p* fois pour obtenir la machine. Les bobines qui se situent sous chaque pôle dans la même configuration seront toutes dans les mêmes conditions : leur mise en série ou en parallèle ne changera rien à la physique de la machine. Seules les grandeurs externes comme la tension ou le courant seront multipliées ou divisées par un facteur *p*. Le fait de fractionner ainsi en plusieurs bobines n'augmente pas le nombre de signaux différents observables au sein de cette machine : seul le nombre de connexions change. Bien entendu le fait d'alimenter chaque bobine par un convertisseur d'électronique de puissance accroit la liberté d'alimentation. Il peut être possible ainsi de réaliser des connexions en série ou en parallèle de façon dynamique permettant par exemple d'adapter la machine pour un fonctionnement dans de très larges plages de vitesse. Cela permet également de changer le niveau de tolérance aux pannes de la machine. Afin de distinguer des machines à *n* phases présentant *n* signaux différents pour chaque grandeur des machines à *n* phases comportant un nombre inférieur (souvent *n* /2) de signaux différents, E. Klingshirn [104][105] a proposé l'appellation de semi- *n* phases. Néanmoins cette appellation n'a guère été retenue dans la littérature. On trouve ainsi de nombreux articles sur des machines à six phases qui dans leur

[7] Pour augmenter la tolérance aux pannes par exemple ;

fonctionnement fondamental sont des machines à trois phases. Il y a de ce fait différentes appellations pour distinguer entre elles les différentes machines à 6 phases.

Enfin, la dernière définition d'une machine polyphasée qui est sans doute la plus fondamentale consiste à considérer une machine dont le ***nombre de courants indépendants est supérieur ou égal à deux***, deux étant le nombre minimum permettant de réaliser un champ tournant ou, vu d'un côté plus mathématique, un vecteur courant de dimension 2.

Les machines électriques les plus utilisées dites triphasées sont sans aucun doute les machines électriques comportant trois fils en sortie et 3 phases connectées en triangle ou en étoile sans neutre sorti. Chaque phase est constituée (pour une machine bipolaire) de 2 bobines décalées de 180° et connectées entre elles. Ce sont bien évidemment les autres machines polyphasées qui feront l'objet de notre étude.

Considérer le nombre de phases comme un paramètre supplémentaire dans la conception et la commande des machines électriques devient une opportunité technologique du fait de l'augmentation de la puissance des processeurs temps réel qui permettent la commande des machines. Bien entendu, changer le nombre de phases suppose implicitement que l'on s'intéresse à des entrainements électriques où les machines sont alimentées par des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance et non directement couplées au réseau triphasé.

Par ailleurs, la modification du nombre de phases ne peut s'envisager que dans deux cas :

- soit elle apporte un avantage par rapport à une structure triphasée
- soit elle apporte une solution impossible en triphasé

On peut penser qu'au sens industriel c'est principalement le deuxième cas qui mènera au choix d'une machine polyphasée: on se situe donc dans des configurations de niches alors que c'est l'étude du premier cas qui ouvre un champ bien plus vaste d'investigation et qui requiert le développement d'outils théoriques génériques.

16. Approche des problématiques par étude de cas

Avant de considérer le nombre de phases en tant que paramètre de dimensionnement, les études sur les machines polyphasées ont surtout porté sur des machines comportant un nombre donné de phases différent de trois mais bien défini. De ce fait, on dispose à présent de nombreuses études sur des machines particulières ou sur des familles particulières de machines polyphasées. Ces études mettent en évidence pour des cas particuliers des avantages et parfois des inconvénients des machines polyphasées.

Dans l'état de l'art que nous dressons par la suite nous distinguerons les machines simplement par leur nombre de phases en mettant en évidence les spécificités mises en exergue et en précisant si besoin est, pour un même nombre de phases, les différentes structures.

Nous distinguerons trois grandes familles de machines polyphasées ayant fait l'objet d'études : les machines triphasées avec trois courants indépendants ; les machines hexaphasées et autre machines multi-étoiles; les machines pentaphasées et heptaphasées.

- **Les machines électriques triphasées avec 3 courants indépendants.** Cette famille de machines a surtout été étudiée afin de conférer une fonctionnalité de tolérance aux pannes accrue en comparaison avec une machine triphasée classique. L'attrait de ce type de solution est bien évidemment de réaliser une modification mineure au niveau du processus de fabrication de la machine : il suffit de modifier la connectique des bobines. Différentes machines ont ainsi été étudiées en alimentant les trois phases indépendamment par trois onduleurs monophasés [14], [68]. L'objectif est de permettre de valider la possibilité de travailler avec une phase non alimentée ou avec un court-circuit [201] [202] et d'examiner les conséquences induites thermique (température) [14], et mécaniques (couple et vibration) [68]. Pour un même couple moyen les pertes Joule sont plus élevées (et donc la température) : cela est dû évidemment[8] à la répartition inégale des contraintes. Le couple moyen n'est alors certes pas nul, mais le déséquilibre spatial provoque des pulsations de couple conséquentes. Les deux phases restantes étant décalées de 120° (électrique) entre elles, le déséquilibre est important en cas de phase non alimentée : les contraintes sur les deux phases restantes deviennent fortes si l'on veut conserver un couple résultant avec un niveau acceptable

[8] Puisqu'une partie des parties actives de la machine n'est plus utilisée.

d'ondulation. Bien entendu, la commande peut être adaptée afin de réduire les couples pulsatoires [18][25][199] : cela induit des pertes ainsi que la nécessité de sur-dimensionner le convertisseur statique [203]. Il faut donc se poser la question du gain réel quant à la conservation d'une structure triphasée si cela implique un surcout important au niveau du convertisseur.

- **Les machines hexaphasées (**dite encore double-triphasée [160] ou double-étoile, p 49**);**

Considérons ici la famille la plus utilisée des machines polyphasées. Une machine hexaphasée « classique » comporte six bornes de sortie. Elle est réalisée à partir d'une machine comportant au moins six bobines avec un couplage double-étoile. Le succès de cette machine lorsqu'elle est alimentée par des ponts à thyristors tient à deux caractéristiques essentielles :

- ✓ Chaque étoile peut être alimentée par un pont à thyristors triphasé et il suffit de décaler temporellement les commandes d'un retard lié au déphasage spatial de 30° (électrique) pour obtenir un contrôle correct d'une machine ; la fréquence des pulsations de couple est naturellement 12ω alors qu'elle est de 6 ω pour une machine triphasée. Par ailleurs les amplitudes des pulsations de couple sont quant à elles plus faibles qu'en triphasé ; au global ce type de machine est plus discrète (en terme de bruit) d'où son utilisation également en tant qu'alternateur automobile haut de gamme ou en propulsion marine;
- ✓ Lorsqu'une phase ne peut plus être alimentée, il suffit de ne plus alimenter les deux autres phases de la même étoile pour retrouver les caractéristiques d'une machine triphasée : la commande en mode dégradée est donc incomparablement plus simple que dans le cas d'une machine triphasée non couplée alimentée par onduleur de tension.

Lorsque les premières alimentations par onduleur de tension ont été considérées, c'est naturellement ce type de machines qui a été testé en premier lieu. Dans le cadre de commande pleine onde, Klingshirn a expliqué l'origine de pic de courant observé plus important que prévu. Dans [104][105], Klingshirn utilisant la méthode des composantes symétriques (valable en régime permanent) met en évidence qu'il faut considérer trois circuits (du même type qu'un schéma monophasé complexe) pour caractériser la machine. A chaque circuit est associée une famille d'harmoniques ainsi qu'une inductance. Pour une machine à force magnétomotrice sinusoidale deux des inductances sont égales à l'inductance de fuite. De ce fait, la constante de temps associée est très faible, ce qui explique la présence de pic de courant bien plus important que si l'on considère uniquement l'inductance liée au premier harmonique. En effet, si les couplages double étoile permettent de garantir un courant rigoureusement nul dans un des circuits (caractérisé par les

harmoniques multiples de trois), par contre, les courants sont libres[9] de se développer dans l'autre circuit associé principalement aux harmoniques 5 et 7. Les papiers [103], [66] proposent alors l'ajout de filtres spécifiques entre l'onduleur et la machine, des filtres « transparents » pour le premier harmonique mais présentant une impédance élevée pour les harmoniques 5 et 7. Klingshirn remarque dans [103] qu'une autre façon de réduire ces pics de courant pourrait être de réaliser une machine dont la force magnétomotrice contient des harmoniques liés au circuit en cause, à savoir les harmoniques de rang 5 et 7 [104]. Dans [149], c'est un onduleur avec une commande trois niveaux qui permet de réaliser ce filtrage. On retrouve dans [160] par Pasqualini la même conclusion concernant cette fois-ci les pertes supplémentaires liés aux mêmes harmoniques mais de courants. Dans cet article, la modélisation utilise une approche de type transformation de Concordia permettant d'utiliser le modèle en régime transitoire mais en supposant uniquement une approche au premier harmonique.

Contrairement donc au cas d'une machine triphasée, il apparait que la présence d'harmoniques de force magnétomotrice peut être bénéfique[10] dans le cas d'une machine polyphasée afin de réduire les courants induits.

Dans le cas d'une alimentation par onduleur MLI de tension, des problèmes de courants apparaissent également lors de l'utilisation de deux onduleurs triphasés avec une fréquence de MLI qui a été calculée par rapport à la constante de temps du circuit liée au premier harmonique. Il est observé qu'une mauvaise synchronisation entre les deux onduleurs (en fait deux porteuses de MLI non synchrones) mène à la présence de courants hautes fréquences d'amplitude très élevée [139][140][141]. Une solution industrielle apportée au problème fut l'ajout d'inductances entre l'onduleur et la machine (Navire à propulsion électrique à POD de la classe Mistral [132] [177]).

D'autres pistes, pour atténuer les courants parasites sans augmenter la fréquence de MLI, ont été étudiées tant au niveau de la commande par vecteur d'espace (voir paragraphe sur les onduleurs à 6-bras) qu'au niveau constructif [74] en agissant sur les inductances.

Le couplage double-étoile permet la nullité des deux courants (homopolaires) liés aux harmoniques multiples de trois. De ce fait, même s'il existe un harmonique de force électromotrice de rang trois il n'est pas possible d'utiliser cet harmonique pour créer du couple. Si on veut pouvoir

[9] L'alimentation pleine onde induit la présence d'harmonique de rang 5 et 7 en tension.
[10] Dans le cas contraire une alimentation pleine onde de tension induit des courants harmoniques principalement de rang 5 et 7 menant à des pertes Joule.

profiter de cette opportunité il faut modifier la structure de l'alimentation de la machine en alimentant le point neutre. Dans [142] est examinée la mise en œuvre de deux bobinages différents pour ce qui concerne la force magnétomotrice qui comporte essentiellement les harmoniques 1 et 3. Dans [122][123] est mis en évidence que l'alimentation des neutres d'une machine double-triphasé permet d'accroitre jusqu'à 40% le couple avec une meilleure répartition du champ magnétique dans l'entrefer mais avec bien sûr également une augmentation des pertes Joule. L'intérêt est l'augmentation du couple massique de la machine : la clé de cette augmentation du couple massique est l'utilisation de l'harmonique de rang 3 qui permet de saturer plus uniformément les matériaux magnétiques en comparaison avec une machine triphasée ; pour un même niveau de saturation, le premier harmonique du flux apparaît avec une amplitude plus élevée que dans le cas d'une machine triphasée. Ce même type d'approche utilisant plusieurs bobinages triphasés différents a été examiné également dans [34] pour conférer à des machines adaptées une capacité au défluxage en traction.

Enfin [5] [205] [206] examinent et quantifient l'effet d'une ouverture de phase ou d'un court-circuit tant sur les pertes Joule que sur les pulsations de couple.

On retiendra globalement que pour une machine double-étoile sans neutre sorti, l'harmonique de rang trois n'est pas directement exploitable et qu'il est nécessaire de contrôler les courants parasites liés au plan associé aux harmoniques 5 et 7. Les avantages qui existaient dans le cas d'une alimentation par ponts à thyristors ne sont plus patents. D'autres structures polyphasées pourront être plus intéressantes comme les structures à nombre premier de phases.

- **Les machines pentaphasées et heptaphasées;**

Les machines comportant un nombre premier de phases n'ont pas, comme c'est le cas des machines multi-étoiles (comme la machine double triphasée), de passé industriel. Ne pouvant pas être alimentées par le réseau triphasé elles ne peuvent se justifier que dans le cadre d'entraînements à vitesse variable. De plus, le développement de ce secteur de la vitesse variable s'est tout d'abord réalisé en cherchant à utiliser les machines triphasées classiques (avec convertisseur d'électronique de puissance). Enfin, il a fallu attendre l'explosion de la puissance des processeurs de traitement du signal pour envisager d'augmenter le nombre de phases à gérer…et il en faut encore plus pour pouvoir implanter la gestion des modes dégradés.

Bien évidemment, il est logique de se poser la question de l'intérêt d'une machine à 5 ou 7 phases dans la mesure où on dispose déjà de machines double-triphasées avec une tolérance aux pannes

qu'il est certes possible d'améliorer mais qui existe. Autrement dit, qu'est ce que peut apporter de plus le passage à 5 ou 7 phases ?

C'est principalement Toliyat/Lipo qui fournissent une première réponse dans une publication comparative [194][195] donnant pour un même courant une augmentation du couple de 10% pour une machine à induction à 5 phases en comparaison à une machine à trois phases. La machine, dont le bobinage est à pas diamétral concentré, est alimentée par onduleur de tension. Cette augmentation du couple par Ampère s'explique par la mise à profit des harmoniques de force magnétomotrice par une alimentation en créneau de courant : c'est l'augmentation de la densité de flux magnétique dans le matériau ferromagnétique qui en est la cause. Par ailleurs, il est rappelé dans ces articles que tous les harmoniques n'interagissent pas entre eux : on peut définir des familles d'harmoniques. C'est d'ailleurs l'exploitation de l'harmonique de rang 3 de force magnétomotrice couplée à celle d'un harmonique de rang 3 de courant qui est fondamentalement à l'origine de cette augmentation du couple massique. Une analyse par éléments finis [191] confirme l'approche analytique et expérimentale précédente : à densité magnétique de dent donnée et à courant donné, une machine à 5 phases permet une augmentation de 10,6% du couple (9,3% pour 7 phases, 1,2% pour 6 phases), ceci en prenant pour référence une machine triphasée à pas raccourci mais un peu plus longue de façon à présenter les mêmes pertes Joule. De nombreux articles se sont attachés ensuite à réaliser des commandes d'une machine à induction (discussion au paragraphe 0). Cette augmentation du couple à pertes Joule données a été explorée et confirmée de façon plus approfondie expérimentalement dans le cadre d'une commande scalaire en boucle ouverte [173] (accroissement de 15% du couple et de 18% de la puissance mécanique).

Ce gain, lié à la présence de l'harmonique de rang 3, a été étudié dans [190] [192] [209] pour une structure de machine synchrone à réluctance variable pure. Le gain apporté en couple, toujours pour un même courant efficace (mais en injectant 33% d'harmonique de rang 3), est de 10%. Xu dans [209] compare la structure analogue à celle étudiée précédemment (avec une augmentation de 24% du couple par injection d'harmonique de rang 3) avec une autre structure à réluctance variable (rotor laminé axialement) pour laquelle l'injection d'harmonique de rang 3 ne permet pas d'augmenter le couple. Par contre, la seconde structure permet d'obtenir un couple plus élevé qu'avec la première lorsque seul un harmonique de courant est imposé. La conclusion est que le résultat dépend de la structure du rotor. Rakgati dans [165] arrive à la même conclusion dans le cadre d'une comparaison analogue mais avec une optimisation de chaque rotor.

Les autres articles concernent les machines à aimants permanents mais généralement la machine fait assez peu l'objet d'une étude en elle-même car c'est plutôt le « drive » qui est décrit. Les machines présentées comportent des bobinages assez simples de type pas diamétral concentré. Peu d'études sont consacrées proprement dit à la conception de la machine. Il y a certes description (voir Tableau 2) de la machine qui fait partie de l'entraînement. Il y a aussi souvent une caractérisation par éléments finis et une prédétermination des couples de détente. Dans certains cas, des machines sont comparées (de trois à cinq phases ou plusieurs 5 phases entre elles). Ainsi dans [154], deux machines à 5 phases et une machine à 3 phases sont comparées en utilisant un même rotor à 4 pôles mais en changeant le nombre d'encoches (15 ou 20) : le bobinage à pas fractionnaire et cinq phases mènent alors au plus faible couple pulsatoire pour un couple moyen plus élevé (voir table I dans l'article [154]). Dans [155], ces mêmes machines sont alimentées par différentes formes de courant et comparées à une machine triphasée alimentée soit en créneaux de courant soit par des courants sinusoidaux (voir Table I dans l'article [155]): dans le cas d'une alimentation bi-harmonique (Harmoniques 1 et 3) en pentaphasé on obtient une augmentation du couple moyen entre 14% et 17% avec un niveau d'ondulation de couple réduit de moitié en comparaison avec le cas de la machine triphasée alimentée par des courants sinusoidaux. On pourra noter par ailleurs des bobines à pas entier ou à pas fractionnaire, des rotors à pôles lisses ou à pôles enterrés (voir Tableau 2). Néanmoins, il n'existe pas d'étude exhaustive mis à part dans [53]. Dans ce dernier article, on trouvera notamment des tableaux comparatifs concernant les combinaisons possibles entre nombre d'encoches et nombre de pôles de façon à maximiser le coefficient de bobinage, paramètre qui mesure l'aptitude d'une machine à capter par ses bobinages le champ présent dans l'entrefer. Les bobinages comparés sont de type concentré autour d'une dent. Ces bobinages posent classiquement des problèmes pour les machines triphasées du fait notamment de la création de sous-harmoniques [17] générateurs de vibration. Pour les machines polyphasées, la répartition des sous harmoniques sur plusieurs espaces permet de réduire cet inconvénient. Par ailleurs le choix de tels bobinages pour les machines polyphasées constitue également une façon d'obtenir des constantes de temps du même ordre pour les différents espaces caractéristiques, élément important lorsqu'on se place du côté du concepteur de la partie convertisseur statique/contrôle commande.

On trouvera ainsi que les machines pentaphasées présentées dans [2] [3] et [19] correspondent aux valeurs les plus élevées de ce coefficient de bobinage, de même [37] et [53] pour une machine heptaphasée. Ceci étant, d'autres éléments tels que le couple de détente, le taux de remplissage des

encoches réalisable, la longueur des têtes de bobines et la valeur des inductances de fuite interviennent dans le choix final de la structure.

On retiendra qu'après avoir mis en évidence, dans le cas de bobinages à pas diamétral concentré, la capacité des machines polyphasées à tirer profit d'harmoniques de bobinage pour augmenter le couple, l'intérêt se porte aujourd'hui sur l'utilisation de structures à bobinages concentrés autour de dent.

Tableau 2: caractéristiques principales des machines synchrones à aimants à 5 et 7 phases étudiées

Références	Nbre encoches par pole et par phase	Pôles lisses	Pôles enterrés	Nombre d' encoches	Pôles	Nombre de phases	Auteur/année
[28]	2/11	X		20	22	5	Chan/94
[31]	2/3	X		20	6	5	Chang/03
[178]	1	X		60	12	5	Simoes/01
[200], [7],[49]	1/6	X		10	12	5	Howe/03
[152], [155]	2 ou 1	X		40 ou 20	4	5	Toliyat-Parsa/03
[19], [16]	2/9	X		20	18	5	Bianchi/06-08
[17]	¼	X	X	10	8	5	Bianchi/06
[145]	5/6	X		5	6	5	Lipo/07
[4]	3/16	X		45	48	5	Abolhassani/05
[154], [159]	¾		X	15	4	5	Toliyat-Parsa/05-07
[170]	1		X	30	6	5	Sul/04
[3]	2/9		X	20	18	5	Abolhassani/07
[2]	3/14		X	30	28	5	Abolhassani/05
[37]	1/8	X		14	16	7	Dhawan/04
[53]	3/22	X		21	22	7	Cros/03
[CI3]	1	X		30	6	5	Semail/02
[R12]	1	X		42	6	7	Semail/06
[CI31]	1/4	X		28	16	7	Semail/08

- **Quelques applications industrielles;**

Après ces informations relatives aux études menées sur les machines polyphasées dans le domaine académique, voici quelques exemples d'utilisation industrielle:

✓ Machines double triphasée: Ventilateur 100 MW (ABB), génératrice pour éolienne 600 kW E40 (Enercon), génératrice pour éolienne LW50 750 kW (Lagerwey), Générateur 60kVA de l'A380 (Airbus), Moteur de propulsion marine (Siemens, Alstom, ABB) ;

✓ Machines double triphasée alimentées par onduleurs de tension : propulsion électrique marine (moteur synchrone de POD 12 MW Alstom) ;

✓ Machines synchrones à aimants permanents à cinq phases (ventilateur Siemens pour automobile, petite éolienne KESTREL 2500W à flux axial), à 7 phases pour moteur roue Vélo Electrique MATRA (75Nm/250 W) ;

✓ Generateur 9 phases turbogenset 20 000 tr/mn/1,2 MW ;

✓ Moteur de sous marin Siemens Permasyn à 12 phases alimenté par onduleur de tension ;

✓ Machines à 2*13 phases Jeumont alimentées par onduleur de tension: moteur de sous marin Scorpene;

✓ Machine à 15 phases Alstom (3 étoiles à 5 phases) alimentée par onduleur de tension: moteur de propulsion électrique en marine (19MW/150 tr/mn).

17. Les approches conceptuelles génériques

Les approches génériques concernant les machines polyphasées n'existent que pour quelques familles :

[F 1] Les machines à pôles lisses à forces magnétomotrices et électromotrices sinusoidales.

[F 2] Les machines à pôles lisses avec bobinages à pas diamétral

La famille [F 1] a été étudiée de façon assez exhaustive par White, [204], dans son excellent chapitre 9. Par une transformée de Concordia généralisée apparaît la possibilité de décrire la machine en considérant un ensemble de schémas électriques aux phaseurs complexes (utilisant les composantes dq). Par contre, étant donné que la démonstration est réalisée en prenant l'hypothèse du premier harmonique, tant pour les forces magnétomotrices que pour les forces électromotrices, la problématique de l'étude des machines synchrones à aimants permanents qui ne vérifient par ces hypothèses reste entière. Bien entendu, si le contenu spectral des forces magnétomotrices et électromotrices se réduit principalement à un harmonique, il sera possible d'utiliser avec de bons résultats la modélisation proposée. Le problème est qu'une machine à force magnétomotrice sinusoidale n'est pas une bonne machine polyphasée (hormis dans le cas triphasé) lorsque cette dernière doit être alimentée par des onduleurs de tension. En effet, White montre que, dans le cadre de son hypothèse, un seul circuit électrique est associé à la force électromotrice de la machine [204].

De plus, les autres circuits sont caractérisés par une résistance et une inductance liée aux fuites magnétiques. En d'autres termes, dans le cas d'une machine sans fuites magnétiques, les constantes de temps électriques sont nulles. De ce fait, la machine est très sensible à des variations brutales de tension puisqu'il n'y a plus de fonctions de filtrage. Une alimentation par onduleur de tension provoque alors des courants parasites très importants. Par contre dans le cas des alimentations par commutateurs de courants (ponts à thyristors), de faibles inductances côté machine facilitent les commutations.

La famille [F 2] a été étudiée par Lipo/Toliyat dans [194][195] pour des machines à induction alimentées par onduleur de tension pleine onde. L'aptitude à exploiter au mieux les harmoniques pour produire du couple est examinée en fonction du nombre de phases de la machine[11]. Par ailleurs y est démontré comment, pour ce type de bobinage à pas diamétral concentré, interagissent entre eux les différents harmoniques. Y est alors démontré, dans ce cas, la présence de familles d'harmoniques déjà mises en exergue dans [104] mais sans démonstration.

Par ailleurs, on trouvera dans [5][6][114], pour les machines à induction polyphasées, une synthèse d'études précédentes sur l'intérêt d'une augmentation du nombre de phases pour cette technologie. Certes, les machines à induction disposent d'un atout concernant la robustesse de leur rotor qui a permis longtemps, par l'usage de densités de courants élevées[12], de présenter des couples massiques/volumiques intéressants au regard des machines synchrones excitées. Néanmoins, l'augmentation de la valeur des champs rémanents des aimants permanents permet aux machines synchrones de présenter à présent de meilleures caractéristiques.. C'est probablement la raison pour laquelle la plupart des articles dans le domaine des machines polyphasées concerne à présent les machines synchrones à aimants permanents, que nous avons choisies de privilégier dans nos travaux dès les années 2000.

Ceci étant, lorsque les aspects fiabilité/tolérance aux pannes sont un point fort du cahier des charges sans contraintes prégnantes en termes de puissance massique, alors les machines à induction sont les mieux placées pour occuper ce secteur. C'est donc essentiellement dans le domaine du

11 La définition du nombre de phases est celle proposée par Klingshirn [104] qui y distingue les machines n-phases des machines semi-n phases

12 Mais au prix d'un rendement moins bon…approche fortement remise en question dans le cadre des moteurs HQE (Haute Qualité Energétique)

développement pratique des commandes à tolérance de pannes que les activités de recherche devraient se développer pour ce type de machine.

En résumé les études génériques qui ont été jusqu'à présent menées concernent principalement les machines à induction qui constituent un secteur ayant atteint une bonne maturité.

Les convertisseurs d'électronique de puissance pour machines polyphasées

18. Approche des problématiques par étude de cas

Historiquement, les machines polyphasées industrielles développées étaient, on l'a vu, de type multi-étoile triphasée avec surtout la structure double–étoile (double-triphasée) comportant deux étoiles triphasées avec un déphasage de 30° électrique entre les deux étoiles (Figure 7). Ces machines étaient alimentées par des ponts à thyristors qui imposent des créneaux de courant. L'utilisation de ces dispositifs, certes encore très répandus, souffre d'inconvénients[13] qui mènent à s'intéresser à l'alimentation par onduleurs de tension. Dans les années 1980-90, les alimentations étaient alors de type pleine onde en tension avec donc des surintensités notoires étudiées notamment par Klingshirn [103][104][105], dont l'approche a été décrite au paragraphe précédent, et Pavithran [161]. Ce dernier s'est intéressé à l'impact du contenu spectral de la tension sur la forme du courant d'une machine à induction pentaphasée fonctionnant en régime permanent. L'approche théorique est la même que celle de Klingshirn [104], à savoir l'utilisation des composantes directes, inverses et homopolaire. Notamment, est mis en évidence que le bobinage ne filtre pas de façon identique les différents harmoniques. De ce fait, le ratio H_{ck}/H_{c1} d'un harmonique de rang k (H_{cj} amplitude de l'harmonique) du courant peut être plus

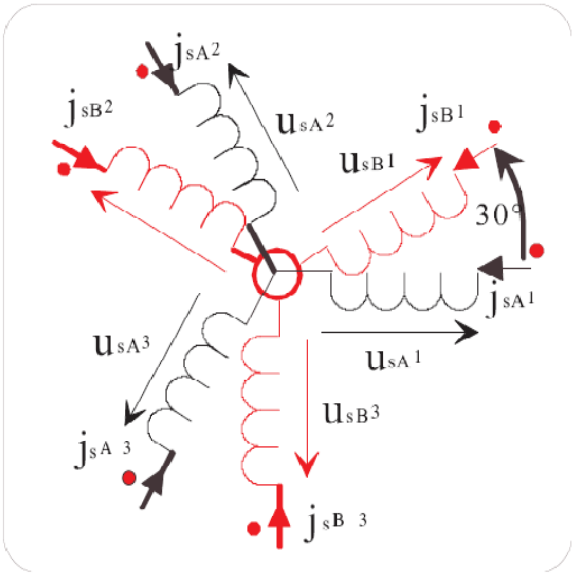


Figure 7: schéma d'une machine double -étoile

13 On citera : système spécifique au démarrage tant que les forces électromotrices ne permettent pas un fonctionnement en commutation naturelle ; un couple maximum défini par une caractéristique spécifique des thyristors (temps de recouvrement du pouvoir bloquant) ; dynamique réduite puisque peu de commutations sont possibles dans une période et que de plus ces commutations ne peuvent par principe être instantanées (connexion entre sources de courant)

élevé que celui H_{vk}/H_{v1} existant dans le spectre de la tension. Ainsi est mise en évidence de façon indirecte la présence de familles d'harmoniques. Est mis en évidence également que l'élimination de l'harmonique de rang 3 dans le spectre de la tension a un fort impact bénéfique sur les fluctuations du courant mais non sur celles du couple. Par contre, la suppression dans le spectre de tension des harmoniques 11 et 13 a un impact très visible sur la réduction des fluctuations du couple sans modifier celles du courant. Bien entendu ces constatations s'expliquent naturellement avec les approches théoriques permettant d'aborder l'étude des régimes transitoires (approches travaillant avec des composantes de type dq).

Ce sont ces dernières approches qui sont utilisées pour l'étude de l'alimentation par onduleurs de tension commandés en MLI et qui font l'objet des développements depuis les années 2000.

On s'attardera donc dans la suite du mémoire à examiner comment sont abordés les onduleurs de tension qui comportent plus de trois bras. Comme pour les machines, les études se feront en fonction du nombre de bras.

Alimentation par onduleur de tension 4 bras : on trouve notamment ces structures dans le cas de l'alimentation du neutre d'une machine triphasée afin de permettre un fonctionnement en mode dégradé ou pour réduire les tensions de mode commun [95], [110]. Plus spécifiquement liées à la structure 4-bras, des études s'intéressent à la commande rapprochée de l'onduleur notamment, au calcul des durées de conduction avec ou non une approche graphique qui cherche à étendre les notions acquises pour les onduleurs alimentant les machines triphasées classiques [67], [108], [207], [217]. [203] étudie en détail les problèmes de saturation de l'onduleur qu'il compare aux autres configurations.

Alimentation par onduleur de tension 6 bras : l'utilisation d'onduleurs à six bras se rencontre soit pour alimenter des machines triphasées avec des bobinages en parallèle [98][99] dans le but d' augmenter les degrés de liberté en mode dégradé, soit pour alimenter plus classiquement des machines hexaphasées (avec déphasage de 30° entre étoiles). De nombreuses études, initiées dans [219] [221], ont été réalisées dans le cadre de commande par vecteur d'espace notamment pour les machines à induction [72][73][75][124]. L'objectif de ces commandes est de maitriser les courants parasites dans le plan lié aux harmoniques 5 et 7 ainsi que les pertes associées [38][24].

Par ailleurs, de nombreux articles ont été consacrés à la commande en mode dégradé (une phase non alimentée). Une approche a été tout d'abord initiée par [58] dans le cas d'une machine à

induction pour une phase non alimentée avec une hypothèse de force magnétomotrice sinusoidale et en s'imposant d'avoir des courants sinusoidaux de même amplitude dans les autres phases[14]. Pour obtenir le même couple qu'en fonctionnement normal les amplitudes de courant doivent être multipliées d'un facteur 1,44 (ou 1,27 si les deux points neutres sont alimentés). Dans [89], la même problématique est abordée pour une machine à induction dans le cas d'une, deux ou trois phases non alimentées dans le cadre d'une commande en boucle ouverte en tension (sans validation expérimentale) et dans le cadre d'une commande avec asservissement de courant (avec validation expérimentale) : la stratégie consiste à considérer que le couple est uniquement défini par les grandeurs tension ou courant imposées dans le plan dq. Sachant que les deux courants homopolaires sont nuls, il reste deux courants dans le deuxième plan de la machine dont les valeurs devront être compatibles avec la contrainte de perte d'une, deux ou trois phases. Dans le cas d'une phase perdue, la dernière composante est réglée de façon à minimiser les pertes Joule. Dans le même esprit, [174] s'intéresse au cas cette fois d'une machine synchrone avec l'hypothèse de forces électromotrices sinusoidales avec une phase non alimentée. Deux composantes de courants sont définies pour imposer un couple constant et la troisième est imposée de façon à minimiser les pertes Joule. Cette stratégie, analogue à celle présentée dans [89] pour une machine à induction, est comparée à la stratégie traditionnelle (tout au moins lors d'une alimentation par ponts à thyristors) dans laquelle lorsqu'il y a un défaut sur une phase on n'alimente plus les deux autres phases de la même étoile. La conclusion de cette comparaison est que la première stratégie est plus intéressante.

Dans [133] est étudiée la commande d'une machine synchrone avec toujours l'hypothèse de forces magnétomotrices et électromotrices sinusoidales avec une phase non alimentée. Des comparaisons sont effectuées d'une part en fonction du décalage entre les deux étoiles (0° ou 30°) ainsi qu'en fonction des différentes possibilités de connecter les points neutre des étoiles toujours avec pour objectif de réduire les pulsations de couple.

On retiendra que toutes les approches décrites ci-dessus sont basées, pour la commande en mode dégradée, sur l'hypothèse du premier harmonique de force magnétomotrice et de force électromotrice. Par ailleurs, les amplitudes des courants parasites dans les machines double – triphasées sont sensibles d'une part à l'alimentation (stratégie de commande de l'onduleur) mais aussi aux amplitudes des harmoniques de la force magnétomotrice (conception).

[14] Cette contrainte permet de préserver une équirépartition thermique entre les phases encore alimentées.

Alimentation par onduleurs de tension 5 bras ou 7 bras :

Les études sur la commande d'onduleurs 5 bras par MLI ne se distinguent guère de celles réalisées pour les onduleurs à 6 bras. Puisque la machine à 5 phases alimentée est couplée en étoile sans neutre sorti, l'onduleur à 5 bras est représenté dans deux plans par un polygone régulier à 10 côtés comportant 31 points distincts qui sont numérotés et correspondent aux 2^5 combinaisons possibles des interrupteurs. Ce polygone est souvent subdivisé en zones qui apparaissent naturellement au sens visuel. La démarche choisie pour réaliser la commande de l'onduleur procède essentiellement d'une approche graphique se basant sur des analogies avec la commande de type vecteur d'espace avec onduleur triphasé.

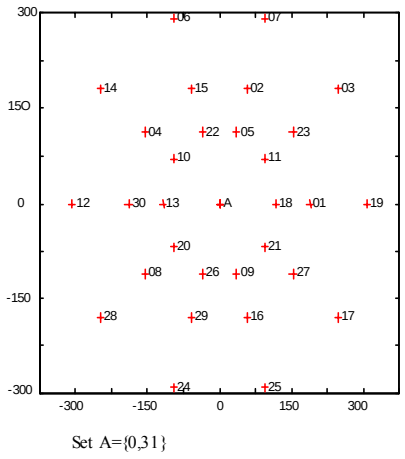


Figure 8: projection de l'onduleur dans le plan caractéristique associé au premier harmonique

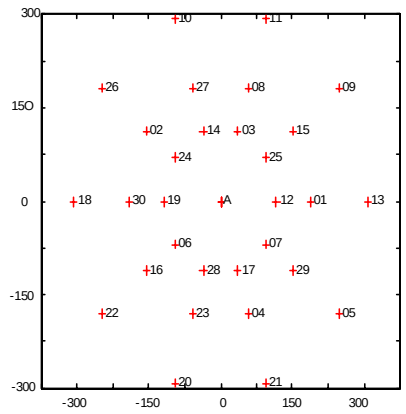


Figure 9: projection de l'onduleur dans le plan caractéristique associé à l'harmonique 3

Un vecteur de consigne est défini dans le plan principal (celui associé à l'harmonique de rang 1), cinq vecteurs du polygone sont alors choisis. Le vecteur de consigne s'exprime ensuite comme une combinaison linéaire de ces cinq vecteurs dont un vecteur nul. Puisque la combinaison linéaire n'est pas unique (quatre vecteurs forment forcément une famille liée dans un plan), l'indétermination est levée en imposant une contrainte dans le deuxième plan (en général la consigne est prise à zéro). Une fois déterminées les durées de conduction de chacun des cinq vecteurs il faut définir la séquence temporelle selon laquelle ils vont être activés.

En fait les premières approches [197] [176] ne considéraient pas 5 vecteurs mais uniquement trois vecteurs pour réaliser la commande (comme en triphasé). De ce fait les tensions générées dans le plan secondaire (lié à l'harmonique 3) n'étaient pas définies explicitement d'où la présence de courants parasites liés au plan secondaire.

Dans [35], la séquence avec laquelle sont utilisés les cinq vecteurs est choisie de façon à ce qu'entre deux vecteurs successifs il s'opère une seule commutation en s'imposant une tension moyenne nulle dans le plan secondaire et une tension sinusoidale dans le plan principal. Dans [212] la même séquence de vecteurs est utilisée mais avec des références de tension non nulles dans le plan secondaire.

Dans [83] une synthèse des différentes commandes proposées est réalisée : la comparaison repose sur les valeurs d'indice de modulation et la qualité de l'onde de tension. Les résultats obtenus en terme d'indice de modulation pour différents choix de vecteurs activés dans le plan principal (dq) sont analysés : en utilisant uniquement les vecteurs de plus grande amplitude et deux vecteurs nuls comme dans [197] [176], l'indice de modulation maximum vaut 1,23 mais avec des tensions non nulles dans le plan secondaire (xy) lié à l'harmonique de rang 3 ; en utilisant 5 vecteurs et une contrainte de tension sinusoidale comme dans [35] on passe à un indice de modulation maximum de 1,05.

Dans [56], les vecteurs nuls qui ne comportent en fait qu'une composante homopolaire ne sont plus utilisés afin de réduire les courants dans les roulements des paliers. Cette approche avait déjà été utilisée en triphasé. Au lieu d'utiliser les vecteurs nuls ce sont des vecteurs appartenant au dodécagone de plus faible module qui sont utilisés.

Dans toutes les approches précédentes, les problèmes de saturation de l'onduleur n'étaient pas pris en considération. Il était implicite que les grandeurs de consigne étaient telles qu'elles correspondent à une solution. Si cette approche est tout à fait acceptable dans le cadre d'une commande en boucle ouverte de type V/f, elle l'est nettement moins dans le cadre de commande de type MLI avec asservissement de courants. Dans [42] cette problématique est abordée : on considère un vecteur dans chacun des deux plans associés à une machine pentaphasée. Il est mis en évidence que même si chaque vecteur de consigne est à l'intérieur du dodécagone caractéristique de l'onduleur dans chaque plan, cela n'implique pas que la somme des deux vecteurs puisse être générée. Différentes solutions sont alors explorées : une première méthode simple consiste à limiter arbitrairement dans chaque plan la surface dans laquelle peut se situer le vecteur de référence. Cette limitation est choisie de façon à ce que la somme de deux vecteurs, appartenant chacun à ces surfaces réduites, appartienne à l'hyper-cube (limitation à 50% de la tension maximale). Cette approche très simple est très limitative. Deux autres méthodes sont alors explorées afin d'augmenter la plage d'utilisation de l'onduleur. On retrouve une approche analogue s'attaquant aux problèmes de saturation d'un onduleur à 7 bras dans [30] : y sont définies trois inégalités devant être respectées

par les trois modules des trois vecteurs références (un par plan). Ces inégalités permettent de définir des surfaces limites (portions de plans) à ne pas franchir pour rester en régime non saturé. Ces approches sont validées en imposant des vecteurs tensions de références en boucle ouverte. Aucune approche en boucle fermée (avec asservissement de courant) n'est considérée.

19. Les approches conceptuelles génériques pour onduleurs

Les études génériques qui considèrent le nombre de phases et donc le nombre de bras d'onduleurs comme un paramètre sont peu nombreuses. Elles s'attachent surtout à mettre en évidence les différences avec le cas triphasé.

Néanmoins on trouve dans [146] une approche générale du calcul des durées de conduction appliquée aux cas des onduleurs à 5 et 6 bras en utilisant une approche matricielle. Une représentation graphique complète de l'onduleur dans tous les espaces propres y compris la droite homopolaire est réalisée et une extension des commandes de type flat-top[15] rappelée dans [148] y est présentée pour l'onduleur à 5 bras.

Par ailleurs [70] met également en évidence, avec une approche tout d'abord en régime permanent utilisant des grandeurs complexes, que les flux de puissance se répartissent entre r systèmes (r=(n-1)/2 si n impair et r=n/2 si n pair) définis par la matrice de Fortescue. Puis, définissant des phaseurs complexes dans ces r systèmes, il met en évidence que cette répartition de puissance est encore valable en régime transitoire.

Dans [86], Levi généralise l'étude concernant l'injection d'harmonique de rang k dans une machine à nombre impair de phases k. L'objet est d'examiner quel peut être l'apport de cette injection pour une utilisation optimale de la tension du bus de tension continu. Il est connu qu'en triphasé l'injection d'un harmonique de rang 3 permet dans le cadre d'une commande MLI intersective d'augmenter l'amplitude du premier harmonique sans saturation de l'onduleur (+15,5%). Il apparait au vu de l'étude que l'intérêt de cette injection diminue lorsque le nombre de phases augmente (voir Tableau 3). Une étude analogue à [86] est également menée dans [69] avec une explicitation par approche matricielle des durées de conduction des interrupteurs.

Dans [97] est proposée une approche générale de calcul des durées de conduction pour une machine à n-phase alimentée par un onduleur à n-bras. Cette approche s'appuie uniquement sur la représentation de l'onduleur dans le plan principal en considérant n+1 vecteurs de façon analogue à [38] pour un onduleur 5-phase avec implicitement une consigne nulle dans le plan secondaire.

[15] permettant notamment une réduction du nombre de commutations [76][20][T1]

Dans [171], l'étude [86] est étendue en mettant en évidence, par des exemples, que les possibilités pour optimiser l'utilisation du bus continu sont plus nombreuses et plus complexes qu'en triphasé mais surtout également qu'il est possible dans certains cas d'utiliser encore mieux le bus continu qu'en triphasé même avec injection d'harmonique de rang 3 (ou plus généralement d'une composante homopolaire). Ainsi en injectant 23,6% d'harmonique de rang 3 avec un déphasage adéquat[16], l'indice de modulation maximum est égal à 1,23 (soit 6,6% de plus qu'en triphasé et donc 23% de plus qu'avec une commande intersective classique). Par contre, le non respect du déphasage peut mener à l'inverse à un taux de modulation de 0,76. En prenant deux exemples de machines synchrones à aimants permanents, l'auteur met alors en évidence que selon le type de machine, un onduleur à 5 phases peut fournir plus ou moins de puissance. L'interaction machine/onduleur/commande est donc mis en exergue de façon particulièrement forte.

Enfin, Levi généralise dans [116] pour un onduleur à n bras l'étude réalisée dans [30] pour un onduleur à 7 bras. Y est mis en évidence que l'indice de modulation maximum diminue avec le nombre de bras si on veut pouvoir évoluer indépendamment dans chaque plan (M_{3max}=1,155 ; M_{5max}= 0,650 ;M_{7max}=0,456, M_{11max}=0,287, etc) ; est montré également que l'injection d'harmonique de rang n pour le plan lié au premier harmonique est de moins en moins intéressante lorsque n augmente (+ 15,5% pour n=3, +5,2% pour n=5, +2,6% pour n=7, etc) mais que par contre si on considère qu'il est possible avec un seul onduleur d'alimenter plusieurs machines (plus précisément (n-1)/2) alors le produit ((n-1)/2)*M_{nmax} augmente avec le nombre de phases (1,155 pour n=3, 1,3 pour n=5, 1,37 pour n=7, 1,44 pour n=11, etc). S'en déduit le fait qu'une utilisation optimale d'un onduleur à n-bras se doit d'alimenter simultanément plusieurs machines, qu'elles soient réelles[17] ou … fictives. On retrouve les conclusions de Sul dans [171].

Tableau 3: tableau extrait de [77]

Nombre de phases	Niveau d'injection d'harmonique	Indice de modulation maximum Mi	Pourcentage d'augmentation du fondamental
3	-1/6* fondamental	1.155	15,5
5	-0,062* fondamental	1.052	5.2
7	-0,032* fondamental	1.026	2.6

[16] Plus précisément on impose une contrainte sur les phases des vecteurs tension dans les deux sous espaces propres : $a\tan\left(\frac{v_{qs3}}{v_{ds3}}\right) - a\tan\left(\frac{v_{qs1}}{v_{ds1}}\right) = \pi$

[17] Dans les articles [30][116] l'onduleur à n-bras permet d'alimenter indépendamment (n-1)/2 machines connectées en série.

9	-0,02* fondamental	1.015	1.5

En résumé, les études génériques sur les onduleurs multi-bras ont été développées dans de nombreux papiers en cherchant tout d'abord à généraliser les concepts bien connus de l'onduleur à trois bras, notamment celui de l'injection d'homopolaire, puis plus récemment en s'intéressant aux possibilités et aux contraintes liées à la charge polyphasée qu'ils alimentent.

L'entrainement électrique : dualité conception/commande

Cette partie concernera essentiellement les articles qui s'intéressent à la commande d'un entrainement polyphasé. En général les articles se focalisent sur le contrôle du couple par l'imposition de courants soit dans les repères naturels (statorique) soit dans des repères obtenus par des transformées de type Park ou Concordia. Les degrés de liberté au niveau de l'onduleur sont utilisés pour minimiser les pertes Joule ou minimiser l'amplitude des courants parasites. Ces commandes se déclinent dans le cas de fonctionnement en mode dégradé. On distinguera là encore les articles en fonction du nombre de phases de la machine.

20. Entrainements « triphasés » avec trois courants indépendants

Les machines considérées comportent trois bobinages non couplés ce qui permet, lorsqu'une phase n'est pas alimentée, de pouvoir encore créer un champ tournant. On trouvera dans [88] une approche considérant un plan (d,q) et une droite vectorielle homopolaire (o) comme introduite par [185] pour une machine triphasée. Dans [88] une approche théorique utilisant les composantes directes et inverses classiquement utilisées pour l'étude des régimes déséquilibrés (avec matrices de type Concordia/Fortescue) est décrite. Une comparaison est réalisée en utilisant des correcteurs soit dans le repère statorique soit dans deux repères tournants (séquence directe ou séquence indirecte). Cette approche donne une solution pour l'étude en mode dégradé mais uniquement en régime permanent en utilisant 4 correcteurs PI. Dans [25] apparait une représentation graphique qui permet de mettre en évidence le passage d'un espace de dimension trois à un espace de dimension deux : la transformation de Concordia est encore utilisée mais sans que ne soit supposé un régime permanent.

Il y a donc une différence fondamentale entre [88] et [25] même si dans les deux articles on voit apparaître la même matrice de Concordia[18].

Dans [25], l'algorithme de commande en mode dégradé calcule les consignes de tension en ajoutant une consigne issue des correcteurs de courants à une consigne issue d'un contrôleur feed-forward (action prédictive) calculant les tensions à ajouter pour tenir compte du passage au mode dégradé. Dans [15], les mêmes auteurs comparent deux types de correcteurs : l'un de type hystérésis (3 correcteurs) l'autre de type PI (deux correcteurs PI dans le repère tournant) avec la même compensation que dans [25]. Dans le cas de l'utilisation des correcteurs à hystérésis, il est remarqué qu'étant donné la faible valeur de l'inductance homopolaire la fréquence des commutations devient très élevée à moins de rajouter une inductance sur le fil reliant le point neutre à l'onduleur. On retrouvera ce type de problématique avec un nombre plus élevé de phases. Dans [199] , on trouvera une extension de [15] et [25] en tenant compte d'un fonctionnement en désexcitation et considérant un mode sans capteur. Enfin [201], [202] s'intéressent au cas du court-circuit toujours en travaillant dans le repère dq. Globalement on peut dire que ces études sont assez exhaustives sur le problème. Toutefois, la présence d'un harmonique de rang 3 de force électromotrice n'a pas été prise en compte dans les équations représentatives des modèles de machines. Si cela ne pose aucun problème dans le cas de machine à induction ce n'est pas forcément le cas pour des machines synchrones à aimants permanents.

Par ailleurs, l'impact que peut avoir la présence d'un quatrième bras dans le cas du fonctionnement en mode normal a peu été abordé. Il est possible d'ignorer cet aspect en supposant ne pas commander le quatrième bras tant que l'on est en mode normal. Dans [59], cet aspect est abordé indirectement en proposant l'utilisation d'une machine synchrone alimentée par 4 bras afin d'absorber les courants harmoniques circulant dans le neutre d'installations triphasées: il est mis en évidence qu'une modification du bobinage de la machine (avec un pas polaire 2/3) permet d'obtenir une impédance homopolaire faible nécessaire à la fonctionnalité désirée. Dans [71], il est mis en évidence, dans le cas d'une machine synchrone comportant un harmonique 3 de force électromotrice, qu'il est possible d'augmenter de 9% le couple à pertes Joule données en injectant un harmonique 3 de courant : la commande s'en trouve néanmoins plus complexe lorsqu'on désire un couple constant. Cette approche a été généralisée dans le cadre de la collaboration sur la thèse de F

18 Il faut prendre garde à ne pas confondre les transformées permettant l'étude des régimes déséquilibrés mais sinusoidaux et celles permettant de travailler en régime transitoire. La représentation par les phaseurs complexes instantanés est de ce point de vue dangereuse puisque ressemblant à celle utilisée dans l'étude des régimes sinusoidaux déséquilibrés (composante directe, inverse et homopolaire).

Meinguet de l'ULB [CI33] mettant en évidence les potentialités et les contraintes liées à la présence d'un harmonique de rang 3 de force électromotrice tant au niveau du couple que d'une utilisation optimale de la tension de bus.

De façon générale, la prise en compte d'harmonique d'espace (fmm ou fem) dans le cadre d'une machine commandée en contrôle vectoriel n'est pas abordée sauf dans l'article [32]. L'approche y est alors la suivante : afin d'obtenir des référentiels où les consignes sont constantes en régime permanent un changement de repère est proposé pour chaque harmonique. Ainsi pour une machine caractérisée par 4 harmoniques (1, 3, 5, 7) cela implique la définition de 4 référentiels. On rejoint en cela [107] qui proposait de modéliser une machine électrique triphasée comportant de nombreux harmoniques (d'espace) par un ensemble de machines fictives. Néanmoins, on imagine la difficulté d'une implantation pratique nécessitant la détermination des harmoniques de courant pour réaliser par rapport à chacun d'entre eux un changement de repère et un asservissement de courant.

A ce niveau, on insiste sur une différence entre machine à induction et machine synchrone : pour cette dernière la présence d'un harmonique de rang 3 oblige à reconsidérer les commandes notamment celles en mode dégradé qui repose sur l'hypothèse de force électromotrice sinusoidale. La présence d'harmoniques complique singulièrement en triphasé l'obtention d'un contrôle ad hoc du point de vue pulsation de couple. En fait, on verra que les machines polyphasées permettent de façon plus simple (et plus robuste) de prendre en compte les harmoniques.

21. Entrainements hexaphasés

Les machines étudiées sont soit de type machine asynchrone [220] [132] soit de type synchrone [12] [R8] ou même synchrone avec amortisseurs [134].

Les contrôles vectoriels sont effectués après avoir utilisé des transformations de type Concordia qui mènent à un découplage total ou partiel des équations. Outre le chapitre de White consacré aux machines polyphasées [204], les deux articles de référence pour la machine à induction sont ceux de Zhao/Lipo concernant l'un la modélisation dans les espaces propres[19] [220] l'autre une commande vectorielle dans ces espaces [221]. Dans ces trois références, c'est seulement l'hypothèse d'un

[19] L'approche développée par Zhao introduit mathématiquement la notion de décomposition de l'espace associée à la machine en plusieurs sous espaces orthogonaux [219]. Par contre, l'origine des vecteurs de base de cette décomposition n'est pas justifiée. Dans le cas du mode dégradé [220], la construction de ces espaces s'opère en partant d'abord du plan où s'opère la conversion d'énergie puis en complétant ce plan par un espace de dimension 3. On notera que dans le cadre d'une approche au premier harmonique Zhao n'aura pas à introduire les notions de machines fictives puisque la conversion électromécanique s'effectue entièrement dans un seul plan.

modèle au premier harmonique (pour les forces magnétomotrices) qui limite la portée des articles. Il en est déduit qu'une machine double-triphasée est équivalente, pour ce qui est de la production du couple, à une machine diphasée. Les autres espaces propres (deux plans) sont caractérisés par l'inductance de fuite et la résistance (et donc une petite constante de temps). De ce fait, les courants à imposer dans ces plans sont égaux à zéro : le problème est lié alors à la nécessité de limiter les courants parasites dans ces plans en utilisant les bons vecteurs de l'onduleur de tension (voir aussi articles [72][73][75][124] déjà cités dans le paragraphe sur les onduleurs à 6 bras).

Pour la machine synchrone, le même type d'approche [177][133][R8] est possible tant que l'on suppose que les forces électromotrices sont sinusoidales. A notre connaissance, il n'y a pas de travaux qui ont été réalisé directement et explicitement par rapport aux harmoniques pour ce type de machine hormis dans [R5] (pour les forces électromotrices).

Les conséquences d'un fonctionnement en mode dégradé [205] ainsi que les commandes permettant une meilleure gestion des pertes et du couple [58] [134] [135] ont déjà été discutées au paragraphe A.I.18 dans la partie consacrée aux onduleurs à six bras.

22. Entrainements pentaphasés et heptaphasés

Dans le cas des machines pentaphasées, un grand nombre d'articles ont tout d'abord concerné la commande en mode normal de machines à induction puis de machines synchrones avant de s'intéresser à la commande en mode dégradé avec une ou deux phases non alimentées.

Après l'implantation de contrôles vectoriels classiques [210], ce sont des commandes de la machine à induction en contrôle de type DTC (Direct Torque Control) [211] qui ont été réalisées dans les repères (d1,q1) (d3,q3) avec des régulateurs à hystérésis pour le contrôle des courants. Des comparaisons de commande avec ou sans injection d'harmonique de rang 3 ont été implantées afin d'évaluer le gain en couple pour un niveau de perte Joule donnée : une augmentation de 10% constatée confirme les prédictions analytiques et celles calculées par éléments finis [191]. L'étude a été complétée dans [215] en garantissant une synchronisation entre les références de flux relatifs à chaque plan afin de travailler toujours avec une répartition optimale du flux dans l'espace. La spécificité des machines à induction est que le flux magnétisant est directement contrôlé par l'alimentation/commande. Il est donc possible de magnétiser ou non le plan secondaire (celui qui n'est pas associé au premier harmonique) afin de produire ou non du couple supplémentaire. ***Le contrôle vectoriel le plus classique ne tient compte que du plan principal pour générer et contrôler***

le flux. La version améliorée crée également par injection d'harmonique trois de courant un harmonique de rang 3 de flux.

Concernant le contrôle en mode dégradé avec une ou deux phases non alimentées, les premiers travaux furent développés dans [58][187] en s'imposant de retrouver une force magnétomotrice tournante identique à celle en mode normal avec de plus une amplitude imposée égale pour tous les courants présents dans les phases saines. Cette approche, si elle garantit quasiment une équi-répartition de la chaleur dans les phases saines, repose sur une approche au premier harmonique d'espace de la machine. Dans le cas des machines à induction où la magnétisation est imposée par l'alimentation, cette restriction n'est pas trop problématique puisque facilement vérifiée. Les nouvelles références de courant à imposer sont calculées pour chaque type de défaut et ensuite imposées par des asservissements de courant. [90] développe une approche qui consiste à rechercher directement les vecteurs tensions à imposer, dans le cadre d'une commande en boucle ouverte, pour retrouver les mêmes tensions (v_d, v_q) dans le plan principal qu'en mode normal : cette détermination des vecteurs tension s'opère en utilisant l'approche graphique des vecteur d'espace. Par ailleurs [62] présente d'abord l'impact d'une ouverture de phase dans le cas d'une commande vectorielle avec injection d'harmonique de rang 3 notamment concernant les pulsations de couple. Ensuite [62] examine l'effet de spires en court-circuit pour répondre d'une part à la question de la durée disponible de réaction avant destruction du moteur (température maximale) et d'autre part à la façon d'augmenter cette durée par un contrôle du courant i_d en mode de désexcitation. Enfin une étude [44] tenant compte de problèmes de stabilité par la théorie des bifurcations conclut que l'injection d'un harmonique de rang trois augmente la stabilité du contrôle.

Concernant la machine à induction et son contrôle, une application intéressante, tout au moins du point de vue académique, est celle qui consiste à contrôler avec un seul onduleur 5 bras de façon indépendante deux machines à induction à cinq phases dont les bobinages ont été mis en série de façon particulière. Initié dans [61] cette approche a été développée par Levi dans [113] [93][84] [85][115][116][42] confirmant, notamment avec des résultats expérimentaux, la possibilité de ce type de commande indépendante mais aussi les contraintes au niveau de la commande de l'onduleur.

En résumé on retiendra que les machines à induction ont fait l'objet de nombreuses études validant les concepts d'augmentation de couple massique en mode normal et de fonctionnement en mode dégradé. Le fait que c'est l'alimentation/commande qui impose la magnétisation de la machine permet de contrôler les harmoniques présents dans le flux. De ce fait on peut se placer

dans des conditions où les hypothèses se fondant sur une approche au premier harmonique se vérifient, notamment en mode dégradé.

Concernant les machines synchrones à aimants permanents, Simoes propose dans [178] une approche du contrôle dans le repère du stator mais les articles [169] , [155] qui suivront utiliseront une approche dans les espaces propres permettant l'usage de correcteurs classiques de type PI : cette approche sur l'utilisation d'une matrice de Park généralisée considère une rotation d'angle $p\theta$ pour le plan lié au premier harmonique et d'angle $3p\theta$ pour le plan lié à l'harmonique de rang 3. Si [155] s'intéresse à une machine à pôles lisses à force électromotrice trapézoidale, [169] considère une machine comportant des effets réluctants mais à force électromotrice sinusoidale et développe une approche avec des phaseurs d'espace en superposant sur un même plan différents phaseurs. Dans les deux cas, un contrôle des courants est effectué dans chacun des deux plans. Dans [157], le contrôle préalablement développé dans [155] est complété pour un travail à flux variable (à puissance constante). Dans [54], on trouvera une approche différente de contrôle basée sur l'utilisation de sondes à effet Hall afin d'imposer des créneaux multiniveaux de courant avec deux variantes : la première utilisant des capteurs de courant par phase, la deuxième uniquement un capteur de courant sur le bus continu. Cette approche généralise celle bien connue des commandes en créneaux de courant (avec asservissement par hystérésis) rencontré pour les commandes de machines triphasées à forces électromotrices trapézoidales. Un des intérêts majeurs est de proposer une commande n'utilisant pas de capteur de position couteux mais au prix de pulsations de couple plus importantes.

Pour une machine à pôles saillants classique, la réluctance variable est prise en compte par un harmonique de perméance de rang 2. Le modèle est développé dans [186]. Dans [175][192][169], le contrôle vectoriel qui est élaboré s'appuie sur une transformée de type Park avec pour angles de rotation $p\theta$ et $3p\theta$ selon le plan : le principe est du même type que celui utilisé pour une machine à pôles lisses. Le modèle de ce type de machine fait apparaitre comme en triphasé deux inductances différentes dans chaque plan (L_{d1}, L_{q1}) et (L_{d3}, L_{q3}) : par conséquent un couple réluctant avec une epxression du type « $(L_d-L_q)\, i_d\, i_q$ » apparaît dans chaque plan comme pour une machine triphasée. Néanmoins, il y a en plus un effet de couplage qui s'introduit entre les deux plans : ce couplage se traduit par la présence d'une inductance L_{m13} avec une composante de couple associée proportionnelle à $L_{m13}(i_{d1}\, i_{q3} - i_{d3}\, i_{q1})$. Cette composante de couple peut être nulle si L_{m13} l'est comme dans le cas de [169] ou si par exemple seul un harmonique est injecté dans la machine ((i_{d3}, i_{q3})=(0,0)). Cela dépend donc soit de la conception de la machine (comme cela a déjà été discuté dans A.I.16

« machines pentaphasées » [190] [192] [209]) soit de la commande. L'approche est développée par Sul dans [169], malheureusement le prototype étant à force électromotrice quasiment sinusoidale il n'est guère possible de vérifier expérimentalement l'impact sur le couple de l'harmonique de rang 3 du courant. [55] propose également une méthodologie matricielle pour définir de façon générique les transformations permettant de diagonaliser la matrice inductance par factorisations successives sans utiliser les notions vectorielles de vecteurs propres et espaces propres. L'approche est appliquée tout d'abord à des machines à 3, 5 et 7 phases à pôles lisses puis à des machines à pôles saillants. Pour les machines à pôles lisses on retrouve les résultats présentés dans d'autres articles. Pour les machines à pôles saillants, le couple est fourni en tenant d'harmoniques présents dans les fonctions de bobinages (1, 3 et 5) et dans la fonction de perméance (2, 6 et 10). On retrouve de façon plus générale les résultats de [169]. Par contre il n'y a pas de dispositif expérimental permettant de corroborer les résultats. Par ailleurs, dans le cas d'une fonction de bobinage à répartition sinusoidale, la diagonalisation de la matrice inductance est obtenue (contrairement à [169] qui conserve un harmonique 3 de bobinage). Est mis en évidence l'impact de la présence d'harmoniques de bobinage: d'une part, leur présence ne permet pas la diagonalisation de la matrice inductance ([169]) ; d'autre part leur absence met en évidence que la matrice inductance diagonalisée comporte des termes nuls sur la diagonale. Ce dernier point implique des constantes de temps nulles (si on néglige les inductances de fuite) pour les circuits électriques associés et donc des courants parasites induits en cas d'alimentation par onduleur MLI.

Une autre approche pour le contrôle des machines à réluctance variable est développée dans [193] [176] en utilisant une autre transformation $T(\theta)$ qui aurait la propriété de diagonaliser la matrice inductance et de permettre de contrôler le couple avec uniquement deux composantes de courant i_d et i_q. Néanmoins cette approche repose sur une propriété d'inversibilité de $T(\theta)$ qui en fait n'est pas toujours vérifiée puisque que deux lignes de cette matrice s'avèrent identiques pour $\theta = 0$.

Enfin, le modèle même sur lequel repose les commandes développées dans [175][192][169] [176] est sujet à caution. L'origine du problème soulevé dans [51] vient de la généralisation de la notion de fonction de bobinage au cas des machines à réluctance variable [186]. Néanmoins dans le cas particulier (harmonique 2, 6, 10 de perméance) étudié dans [186] il se trouvait que le résultat obtenu était correct même si la généralisation était non justifiée. Nous avons nous-même rencontré le problème en cherchant à étudier l'effet d'un harmonique quelconque de réluctance en utilisant cette généralisation : les résultats obtenus contredisaient la symétrie de la matrice inductance. Ce problème a par ailleurs donné lieu à l'article [51] remettant en cause les résultats obtenus dans [189]

et [94] pour lesquels la fonction perméance était différente de celle de [186]. [51] propose une autre méthode de généralisation de la fonction de bobinage qui, dans le cas d'une machine à pôles lisses se confond avec le résultat classique. Un article commun [52] de Toliyat et Faiz met finalement en évidence que si l'approche utilisée dans [186] est formellement fausse, elle ne mène cependant pas à des erreurs importantes dans tous les cas.

En résumé, on retiendra que la commande vectorielle de machines à pôles lisses dans les deux plans a été exposée par quelques auteurs : on notera que l'onduleur est toujours alors supposé travailler en régime <u>non</u> saturé. Par ailleurs, les effets de réluctance introduisent en général des couplages entre les différents plans. Néanmoins, il est possible soit en jouant sur la conception de la machine soit en imposant un courant nul dans le plan secondaire de conserver une indépendance entre ces deux plans. De plus, pour une approche théorique plus rigoureuse une généralisation de la notion de fonction de bobinage a dû être introduite. Enfin, La prise en compte simultanée d'un harmonique de rang trois de force électromotrice et d'effet de réluctance variable marquée n'a pas été validée expérimentalement.

Outre les commandes vectorielles utilisant des matrices de rotation à $p\theta$ et 3 $p\theta$ permettant de se placer dans des repères où les consignes de courant sont constantes en régime permanent, un certain nombre d'articles [39] [40] [60] [151] [214] a été consacré à la commande directe du couple (DTC) ce qui permet de travailler sans capteur de position [151]. Comme en triphasé, le repère de travail en DTC est associé au stator : les grandeurs de consigne sont directement le couple et le flux statorique. Deux approches se distinguent. On peut utiliser une table de commutation dont le vecteur tension de sortie dépend de la valeur du flux ainsi que des valeurs de sortie des deux correcteurs à hystérésis liés au flux et au couple. Dans le cas polyphasé, une première approche simple [151] considère que le couple est déterminé par les grandeurs flux et courants existant dans le plan principal (d1,q1) : le contrôle s'opère alors en utilisant uniquement ce qui se passe dans ce plan. L'élaboration de la table de commutation s'opère en découpant en secteurs le plan principal et en choisissant des familles de vecteurs tension. Extension directe des approches réalisées en triphasé, on voit alors apparaître avec cette approche des courants parasites d'amplitude importante liés aux tensions qui sont appliquées dans le plan secondaire. De ce fait les articles récents prennent en compte le vecteur flux dans les deux plans. Dans [60] le même auteur modifie la table de commutation en prenant également en compte le vecteur flux dans le plan secondaire (d3,q3) : les simulations montrent alors une amélioration notable du courant par rapport à l'approche initiale. Dans [214] c'est directement le

choix des vecteurs tension qui seront activés qui est tel que la tension moyenne dans le plan (d3,q3) est nulle, assurant ainsi un courant nul si la force électromotrice dans le plan (d3,q3) est nulle également.

En résumé, on retiendra donc que la commande DTC est possible même s'il n'a pas été question de la taille des secteurs qui diminue avec l'augmentation du nombre de phases et rend de ce fait plus difficile pratiquement l'implantation puisque la sensibilité aux erreurs est accrue. De même l'impact d'harmonique de rang trois de fem n'a pas été pris en considération dans ces commandes. La nécessité de prendre en compte ce qui se passe dans le second plan a néanmoins été mis en évidence.

Enfin, la commande en mode dégradé des machines synchrones à aimants a été abordée dans de nombreux articles. Certaines études vérifient que le comportement de leur machine à cinq phases en mode dégradé [87] est encore satisfaisant, validant ainsi l'aptitude intrinsèque des machines polyphasées à fonctionner avec une ou deux phases non alimentées : le couple fait alors l'objet d'attention particulière puisqu'apparaissent alors des pulsations: ainsi [63] présente une machine à cinq phases avec commande trapèze pour actuateur en avionique ; Abolhassani propose dans [2][3] également des machines à bobinage fractionnaire concentrés permettant une relative indépendance thermique des phases. Dans de nombreux articles une remédiation au problème de pulsations de couple est proposée en tenant compte également des contraintes thermiques. Dans [68] on trouve une première étude dans le cas d'une machine alimentée par des créneaux de courants : lorsqu'une phase n'est plus alimentée, une modification des créneaux de courant dans les autres phases est proposée afin de réduire les pulsations de couple, en limitant le courant efficace à 133% de sa valeur nominale. De même est proposée dans [125][126][128] une stratégie originale qui consiste, lorsqu'une phase est ouverte, à en ouvrir une seconde afin de réduire sans autre modification de la commande les pulsations de couple : bien évidemment cette solution suppose un nombre élevé de phases et a été étudiée dans le cas de moteurs à 26 phases pour sous-marin.

Lorsque la machine synchrone est à forces électromotrices sinusoidales et à pôles lisses alors il est possible de reprendre les études développées pour la machine à induction. De ce fait la méthode décrite notamment dans [58][187] a été reprise dans [53] pour une machine heptaphasée et dans [153] et [158] pour une machine pentaphasée. Dans ces deux derniers articles, l'approche cherchant à conserver la même force magnétomotrice qu'en mode normal en adaptant les courants, est utilisée

alors que l'hypothèse du premier harmonique d'espace n'est plus respectée pour les machines à aimants permanents étudiées. Si les résultats au niveau des courants permettent de mettre en évidence que les asservissements fournissent bien les courants requis, aucune information relative au couple ne permet de connaitre le niveau des pulsations de ce dernier. Dans [153] un harmonique de rang trois de courant est même pris en considération et la superposition des forces magnétomotrices, valable en régime permanent, est encore utilisée en régime dégradé pour calculer les amplitudes de références. Il est néanmoins indiqué clairement dans l'article que cette approche produira des pulsations de couple du fait de l'interaction entre fondamental et harmonique de rang 3 de courant et que la solution, si ces pulsations ne sont pas tolérables, est d'alimenter par des courants sinusoidaux. On notera que les courants désirés, calculés hors ligne et pour un régime permanent, sont obtenus par des asservissements dans le repère du stator avec des correcteurs de type hystérésis.

Dans [200], une approche basée sur la conservation en régime permanent d'un couple constant, sans ondulation, permet de calculer, en utilisant une technique d'optimisation, les courants qu'il faut imposer dans les phases restantes. Les résultats de simulation (référence de courants) sont implantés expérimentalement dans [129] mettant en évidence les contraintes de la commande : sont observés les effets, sur les pulsations de couple, du choix de la fréquence de MLI et de la valeur de la bande passante des correcteurs PI (table II). On notera que les correcteurs PI sont implantés dans le repère du stator avec donc des consignes sinusoidales en régime normal et comportant des harmoniques en régime dégradé : ces conditions sont donc loin d'être optimales pour ce type de correcteurs qui sont plus adaptées à des commandes s'opérant dans les repères de Park.

De même qu'en [200], est repris dans [45] et [48] le calcul d'une optimisation des courants à injecter pour minimiser à la fois les pulsations de couple et les pertes Joule globales. Ne sont plus imposés, contrairement à [58] et [158], des courants sinusoidaux d'amplitudes identiques dans les phases saines. L'optimisation s'appuie sur des multiplicateurs de Lagrange et fournit les expressions des courants à imposer en régime permanent dégradé. Ce calcul assez lourd mène à des expressions similaires à celles que nous avons obtenues plus simplement par l'approche vectorielle dans le repère de Concordia et qu'il est de ce fait possible de calculer en temps réel [CI36].

Dans [47] une technique mixte entre celle de [58] (courants sinusoidaux de même amplitude) et [45] [200] (courants de forme quelconque et d'amplitude différentes pour minimiser les pulsations de couple) est proposée : les courants seront sinusoidaux mais d'amplitude potentiellement différente : une diminution de 2% des pertes est obtenue en simulation.

Dans ces approches [45] [47][48] et [58], les consignes de courants sont calculées dans le repère du stator : l'implantation pratique s'opère en utilisant des correcteurs à hystérésis qui posent donc a priori le problème de l'utilisation de ces méthodes pour les systèmes de forte puissance (spectre variable lié à la commande par hystérésis).

Dans [170] [172], c'est une approche utilisant un modèle valable en régime transitoire qui est développée. Elle prend en compte le cas d'une machine comportant des effets de réluctance variable (approche avec les harmoniques de rang 2 de perméance) mais surtout met en évidence par l'expression du couple l'origine des pulsations de couple annoncées dans [153]. Le défaut de l'approche proposée est que pour chaque nouveau cas de défaut une nouvelle transformation doit être définie. Ainsi dans le cas d'une phase ouverte la matrice de transformation est de type carré 4X4. Par contre, contrairement à l'approche définie dans [58][187] [153] il est possible de travailler avec des correcteurs de type PI en lieu et place de correcteurs à hystérésis : la nouvelle transformation permet de définir un repère de type Park au sein duquel les courants sont constants en régime permanent dans le mode dégradé considéré. De ce fait, le spectre électromagnétique généré par cette approche est compatible avec une application aux puissances élevées.

Dans [16] [18] [19], une étude analytique exhaustive du couple et des pulsations de couple est réalisée pour une machine à cinq phases. L'approche est du même type que celle de [58] mais en acceptant deux harmoniques pour les courants et en tenant compte d'harmoniques dans la force magnétomotrice. Par ailleurs c'est directement l'expression du couple qui est prise en compte pour la détermination des courants à imposer. Les courants imposés dans les phases encore alimentées sont soit purement sinusoidaux, soit se composent d'une somme d'un premier et d'un troisième harmonique. Pour le calcul de la force magnétomotrice, deux cas sont considérés, l'un avec un seul harmonique l'autre en tenant compte également d'un harmonique de rang 3 d'espace. C'est par un choix correct des amplitudes relatives au premier harmonique des courants que l'harmonique de rang 2 de couple est supprimé. C'est le choix des harmoniques de rang 3 qui permet d'éliminer l'harmonique de rang 4 du couple. L'article met également en évidence la sensibilité au paramètre des corrections mais il ne précise pas comment sont obtenus (asservissement par hystérésis ?) les courants requis.

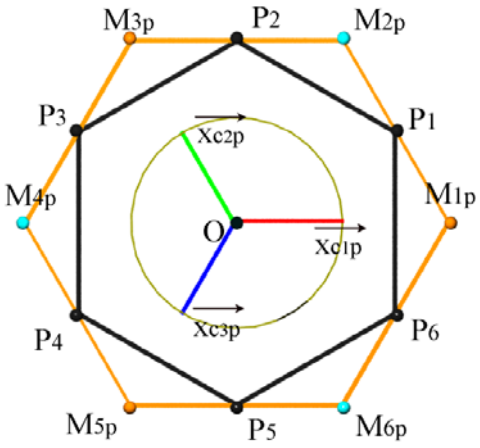
Enfin une étude de fonctionnement en mode dégradé de type court-circuit de phase est proposée dans [46]. L'utilisation, pour chaque phase, de bobines à point milieu permet de réduire le flux capté par la phase en défaut et donc également de réduire le courant de court-circuit.

Développement d'une approche globale

Les machines électriques polyphasées

23. Justification de l'approche vectorielle : compromis tenseur/matrice

L'étude des machines électriques à plus de trois phases permet de mettre en évidence une spécificité des machines triphasées industrielles. En effet, le couplage étoile sans neutre sorti ou le couplage triangle, usuellement adoptés, impliquent que le nombre de courants indépendants se réduit à deux. De ce fait, il est possible de déterminer un espace de travail de dimension deux. L'électrotechnicien peut alors travailler avec des grandeurs complexes communément utilisées lors des études en régime permanent. Les outils de représentation du plan complexe de Fresnel sont directement utilisables mais pour étudier cette fois le comportement de la machine en régime transitoire. Les équations électriques de la machine électrique sont représentées de façon synthétique sous forme graphique. Il faut noter néanmoins que cette approche ne s'est développée qu'à la suite de l'étude des convertisseurs de l'électronique de puissance et tout particulièrement des onduleurs de tension. En effet, c'est tout particulièrement la représentation dans le plan complexe des différents états d'un onduleur de tension à trois bras (par hexagone centré) qui a imposé la description par les phaseurs complexes des machines électriques. On notera que le succès de cette représentation dans le plan complexe des onduleurs est lié à l'explication élégante qu'elle procure sur les commandes des onduleurs avec injection de composante homopolaire (ou encore d'harmonique de rang 3). Cette représentation graphique n'est évidemment pas absolument nécessaire et une part importante de la communauté électrotechnicienne a continué à utiliser l'approche matricielle. L'intérêt de cette dernière est que d'une part tout est explicité mais surtout qu'elle est naturellement adaptée au traitement mathématique des outils de simulation (par exemple Matlab/Simulink). Ce n'est que récemment (une dizaine d'années) que les représentations dans le plan complexe pour l'étude des régimes transitoires se voient intégrer dans les outils de simulation ainsi que dans les appareils de mesure de type oscilloscope ou mesure de puissance.



triphasé de tension par l'hexagone externe dans le cas d'une commande par vecteur d'espace, par l'hexagone intérieur dans le cas d'une commande à homopolaire nul (extrait de [T1]) pour une charge couplée en étoile sans neutre sorti

70/ **Développement d'une approche globale**

Cette réflexion sur l'utilisation de deux outils de représentation, strictement équivalents du point de vue mathématique, des machines électriques triphasées se veut mener à la question suivante : pourquoi deux outils strictement équivalents sur le plan mathématique cohabitent–ils ? Plus précisément pourquoi le formalisme de représentation par les phaseurs complexes s'est il développé ?

Trois éléments ont concouru, de notre point de vue, à ce développement :

- la nécessité d'étudier un système comportant deux éléments (l'onduleur et la machine) étudiés par des disciplines différentes ;
- le caractère graphique du formalisme des phaseurs complexes permettant un échange aisé entre deux spécialités ;
- la disparition de la nécessité de choisir une base de travail. On représente directement des vecteurs dans le plan complexe.

En effet, le contrôle des machines électriques par onduleur de tension a nécessité d'étudier globalement l'association d'un onduleur de tension et d'une machine électrique : les spécialités de l'électronique de puissance et des machines électriques ont été amenées à résoudre un problème de degrés de liberté. Comment, à partir d'un onduleur de tension piloté à partir de trois rapports cycliques a priori indépendants (cas d'une commande en Modulation de Largeur d'Impulsions), alimenter une machine électrique qui comporte seulement deux courants indépendants. La représentation dans le plan complexe de l'onduleur de tension a permis de **résoudre de façon implicite** ce problème en proposant de plus une représentation graphique pratique. Il était ainsi possible de connaitre en temps réel sur un oscilloscope l'état de l'onduleur vu de la machine électrique. Enfin, l'utilisation du phaseur complexe est minimaliste en ce sens qu'il n'est pas nécessaire de choisir une base de travail contrairement au cas du formalisme matriciel. Cela met en évidence une indépendance du système vis-à-vis du choix d'une base.

On retiendra que le développement d'une nouvelle représentation qui n'apporte rien au sens strictement mathématique s'est imposé car cette représentation fournissait un nouvel éclairage d'un problème à résoudre, éclairage permettant de présenter les solutions apportées de façon plus synthétique (approche graphique et vectorielle) donnant lieu de plus à des développements d'outils expérimentaux de visualisation.

Dans le cas des machines polyphasées considérées, le nombre de courants indépendants étant supérieur à trois il n'est plus possible de se contenter d'un plan pour l'étude de la machine. Pour étudier ces entraînements électriques c'est donc a priori l'approche matricielle qui reste seule en lice. Le défaut de cette approche est la perte du caractère synthétique apporté par les phaseurs complexes.

Ce constat nous a conduit à rechercher une approche qui permettrait de mettre en exergue des propriétés intrinsèques indépendantes de toute base de travail (ou de représentation). Cette recherche nous a amené notamment à explorer les travaux de G. Kron sur la modélisation des machines électriques par l'outil tensoriel. Rappelons que cet outil a notamment été développé dans le domaine de la physique pour caractériser des systèmes de façon indépendante des référentiels. Prenons l'exemple de l'étude des cristaux. Dans le cas de nombreuses structures les atomes sont distribués spatialement sur un système d'axes orthogonaux. Ce système d'axes orthogonaux suggère naturellement une base de travail mathématique avec une description matricielle associée. Cette approche montre néanmoins ses limites lorsqu'on s'intéresse à la déformation du réseau cristallin. Dans ce cas, le système d'axes naturels lié à la structure ne forme plus un système orthogonal. La représentation du réseau dans la base mathématique initialement définie devient lourde et peu synthétique. L'apport du formalisme tensoriel est de fournir une représentation qui s'affranchit de la dépendance avec la base de travail [106]

G Kron s'est surtout attaché à l'étude des machines électriques triphasées en tenant compte notamment des harmoniques spatiaux et temporels. La prise en compte des harmoniques spatiaux a amené G Kron à définir l'équivalence d'une machine triphasée avec un ensemble de machines électriques diphasées [107]. Sans nul doute, cet outil tensoriel permettrait effectivement de développer une approche synthétique des machines polyphasées. Néanmoins, se pose la question du caractère indispensable de l'utilisation de cet outil « tensoriel » par ailleurs peu propice à une diffusion scientifique aisée de par le niveau théorique nécessaire. Il nous est apparu à ce niveau que les machines électriques présentaient une différence majeure avec les systèmes physiques utilisant communément l'approche tensorielle. En effet, le choix des axes des bases de travail n'est pas associé pour les machines électriques à des axes qui ont une signification physique. Ainsi, pour les cristaux les axes correspondent à des directions de la structure cristalline. De ce fait, l'apport du formalisme tensoriel n'est pas aussi déterminant. En fait, l'intérêt principal est alors de fournir une

représentation indépendante de la base de travail. Pour conserver cet intérêt il suffit d'utiliser tout simplement l'approche vectorielle des espaces euclidiens.

Nous avons adopté cette approche vectorielle dans le développement des entrainements polyphasés. Il faut néanmoins apporter quelques précisions sur ce que nous considérons par approche vectorielle. En effet, contrairement aux approches utilisées dans le domaine de l'automatique, un vecteur ne sera pas une concaténation de grandeurs pouvant être de natures différentes (approche utilisée dans la représentation d'état où un vecteur est constitué des différentes variables d'état du système). **Un vecteur comportera uniquement des composantes relatives à une même grandeur physique :** courant, tension, flux, fonction de bobinage, etc. Dans ce contexte, les matrices permettant de décrire les relations entre des vecteurs de natures différentes (tension/courant ; courant/flux ; vitesses/couples, etc) ne font que traduire un seul phénomène physique. Ainsi une matrice « inductance » relie un vecteur courant avec un vecteur flux. Ce phénomène physique est indépendant bien évidemment de la base de travail. Il est donc a priori plus judicieux d'associer à ce phénomène un être mathématique qui n'est pas implicitement associé à une base de travail. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré associer une application linéaire (aussi appelé morphisme) ou encore une forme bilinéaire au phénomène physique plutôt qu'une matrice. Cette approche permet de mettre en évidence de façon implicite l'indépendance des phénomènes par rapport aux bases de travail. On rappelle que cette indépendance est à notre sens une des raisons du succès de l'approche par les phaseurs complexes dans le cas des machines triphasées. On substitue ainsi aux notions de tenseurs caractéristiques d'un système les notions plus simples d'application linéaire et de formes bilinéaires. On notera d'ailleurs que dans l'approche tensorielle les applications linéaires et bilinéaires ne sont que des tenseurs particuliers (d'ordre 1 ou 2).

L'intérêt de ce niveau de conceptualisation apparaît lorsque le nombre de phases augmente. En effet, l'écriture matricielle devient très vite lourde et masque, de par la nécessité d'un choix a priori de base, les propriétés intrinsèques du système.

Bien entendu il sera nécessaire lors de l'implantation pratique d'un cas particulier sur calculateur de réaliser des choix de base de travail et donc de ce fait de passer par des expressions matricielles.

En résumé, l'approche vectorielle apparaît comme un bon compromis pour l'étude théorique des entrainements polyphasés entre l'approche tensorielle très concise mais par trop abstraite et l'approche matricielle très pratique mais moins concise.

Les outils utilisés de l'approche vectorielle sont les suivants :

- La notion d'application linéaire (morphisme) caractérisée par les mots clés suivants utilisés dans le cadre de nos travaux: valeurs propres, vecteurs propres, espaces propres, espace vectoriel « noyau », espace vectoriel « image », dimension du « noyau », dimension de l' « image », injectivité, surjectivité, bijectivité ;
- La notion d'application bilinéaire : nous la développerons peu. Elle permet néanmoins de considérer le couple d'une machine comme l'image par une application bilinéaire des vecteurs courants ; cette approche n'ayant pas encore été exploitée, elle ne sera pas développée dans le mémoire[20] ;
- Les notions de produit scalaire euclidien et de produits mixtes sont utilisées pour le calcul des puissances (produit scalaire), du couple (produit mixte) et des durées de conduction en commande MLI (produit mixte et déterminant) ;
- Calcul barycentrique pour le calcul des durées de conduction en commande MLI.

Les développements relatifs à l'approche vectorielle ont été essentiellement réalisés dans les thèses [T1] [T2] ainsi que dans les articles [R2] [R5][CI1][CI3][CI9][CN2]

Le résultat essentiel de l'approche vectorielle, par rapport à l'approche matricielle, est une simplification conceptuelle relative aux notions de transformations. En effet, l'approche vectorielle permet de mettre en évidence, dans le cas d'une machine rotative, l'existence d'espaces vectoriels caractéristiques. Ainsi, pour une machine à 2k+1 phases, on dénombre k+1 espaces propres orthogonaux. La somme vectorielle de ces sous-espaces donne l'espace vectoriel complet et la décomposition d'un vecteur sur ces espaces est UNIQUE.

Cette unicité est à opposer à la multiplicité des transformations matricielles qu'il est possible d'imaginer : cette variété est due au fait que dans chaque sous espace propre il est possible de considérer, si sa dimension est supérieure à 1, une infinité de bases de travail adéquates. Ainsi pour une machine triphasée il y a deux espaces propres : un plan et une droite. Dans le plan on peut choisir

[20] Il existe dans le cas d'une application bilinéaire (comme le couple), des bases au sein desquelles on obtient une expression canonique. On peut ainsi interpréter à la lumière de cette approche les bases de travail définies dans la thèse de G. Sturtzer[181]. Une base non orthogonale permet d'obtenir une expression simple du couple dans le cas d'une machine à réluctance variable.

des bases différentes (et donc des transformations différentes) qui mènent aux coordonnées classiquement dénommées (α,β) lorsque les grandeurs restent alternatives, (d,q) lorsque les grandeurs deviennent continues.

A ce stade il est important de préciser la portée de cette décomposition de l'espace vectoriel en sous espaces. Pour cela il est nécessaire de s'intéresser à la raison profonde de leur existence. Classiquement, ces sous espaces sont mis en évidence lors de l'analyse mathématique de la matrice inductance statorique : ce sont les sous espaces propres caractéristiques de la matrice. On pourrait penser par conséquent que ces espaces sont étroitement liés aux hypothèses qui ont été faites sur la structure de la matrice des inductances.

En fait, l'origine de ces sous espaces est plus simple et plus profonde et l'analyse de la matrice des inductances n'a en fait servi que de révélateur. L'origine plus physique est le caractère cyclique de la machine rotative : après un tour on se retrouve au même point ! De ce fait, les grandeurs spatiales, directement liées à la construction de la machine, bénéficient d'une propriété de périodicité, de cyclicité. Un nombre devient alors fondamental : la racine $n^{ième}$ de l'unité $a=\exp(j\ 2\pi/n)$. Il devient possible de définir une base canonique orthonormale soit dans l'espace vectoriel hermitien soit dans l'espace vectoriel euclidien. Mise sous forme de tableau, cette base donne les matrices bien connues de Fortescue (hermitien) ou de Concordia (euclidien). A chaque vecteur de la base canonique de Fortescue est associée une famille d'harmoniques. Etant donné que dans la matrice de Fortescue il existe des paires conjuguées de vecteurs, il est facile d'en déduire des paires de vecteurs à coefficients réels (sinus et cosinus) : c'est ainsi que s'obtient la matrice de Concordia. Il s'en suit que dans ce cas on associe une famille d'harmoniques au plan engendré par chacune de ces paires de vecteurs canoniques.

On conclut de cette analyse que l'utilisation des espaces caractéristiques mis en évidence par l'analyse de la matrice inductance se justifie dans un cadre beaucoup plus général : celui des machines rotatives.

24. L'apport de la Représentation Energétique Macroscopique pour la machine : l'approche MultiMachine

Si l'approche vectorielle suffit en elle-même (de même que l'approche matricielle) à caractériser les entrainements polyphasés en utilisant les outils précités dans le paragraphe précédent, il s'avère qu'elle présente des inconvénients :

- en terme de diffusion elle suppose la connaissance des outils vectoriels ; si ceux-ci font partie de la culture théoriquement dispensée dans les formations scientifiques classiques françaises leur assimilation n'est pas évidente en pratique. Par ailleurs, cette formation n'est pas forcément considérée de base dans les pays étrangers ;
- dans le cas où la dimension de l'espace vectoriel est supérieure à trois elle ne dispose plus d'une présentation graphique synthétique ;
- elle n'impose pas de façon implicite une organisation des relations vectorielles entre grandeurs.

A ce niveau, l'utilisation de la Représentation Energétique Macroscopique (REM), [27], d'un entrainement électrique pour présenter graphiquement le modèle vectoriel élaboré a facilité la communication et la diffusion des résultats obtenus par l'approche vectorielle.

Le travail de présentation en utilisant la Représentation Energétique Macroscopique a été amorcé dans les travaux des GDR SDSE et ME2MS [CD2][CD3][CD5][CD6][CD7] puis développé dans la thèse de Xavier Kestelyn ainsi que dans divers articles [CI3][CI9][CI10] .

En mettant en évidence, dans un premier temps, la présence de plusieurs flux énergétiques indépendants au niveau d'une machine polyphasée, il a permis de dégager le concept de représentation Multimachines : une machine polyphasée à pôles lisses et sans effet de saturation est équivalente à un ensemble de machines diphasées et monophasées couplées mécaniquement et électriquement mais indépendantes magnétiquement.

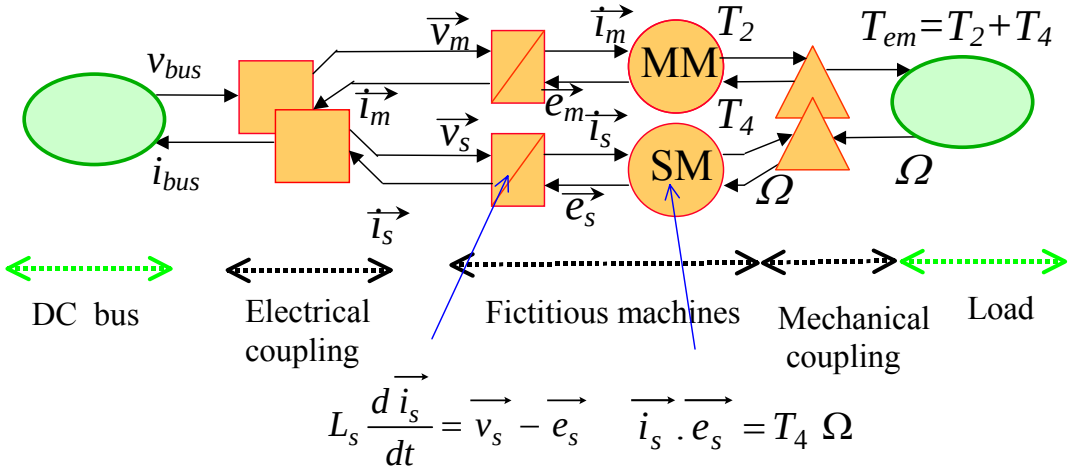


Figure 11: représentation REM d'un ensemble onduleur/machine pentaphasée couplée en étoile (extrait de [CI9])

Dans un deuxième temps, l'étude et la caractérisation des machines diphasées équivalentes ainsi définies a permis de dégager des propriétés harmoniques caractéristiques. Ont été retrouvées des caractéristiques harmoniques des machines polyphasées qui avaient été déjà démontrées dans des cas particuliers. L'apport majeur consistait en une extension [CI9][R5], sans restriction concernant les harmoniques spatiaux présents, des propriétés harmoniques démontrées de façon restrictive soient pour une approche au premier harmonique d'espace [204] soit pour des bobinages concentrés à pas diamétral [194][195]. Il était alors possible de s'intéresser, avec rigueur, à d'autres types de bobinages tout en garantissant le maintien de propriétés harmoniques spécifiques établies uniquement dans des cas particuliers même si parfois utilisées en dehors de ces cadres restrictifs.

Utilisant le formalisme développé pour les machines polyphasées, l'application au cas simple de la machine triphasée fait apparaître le cas tout à fait particulier de la machine triphasée couplée pour laquelle le nombre de machines équivalentes se réduit à un. Les couplages mécaniques et électriques présents dans les autres machines polyphasées disparaissent ainsi. La commande s'en trouve simplifiée puisqu'il n'existe plus de degré de liberté.

Disposant d'une représentation causale de l'entrainement électrique, l'application des techniques d'inversion systématiques définies dans le cadre de la REM a permis de déduire des structures de commande des machines polyphasées. Des libertés existant au niveau de la commande ont pu être dégagées ainsi que diverses lois de commande.

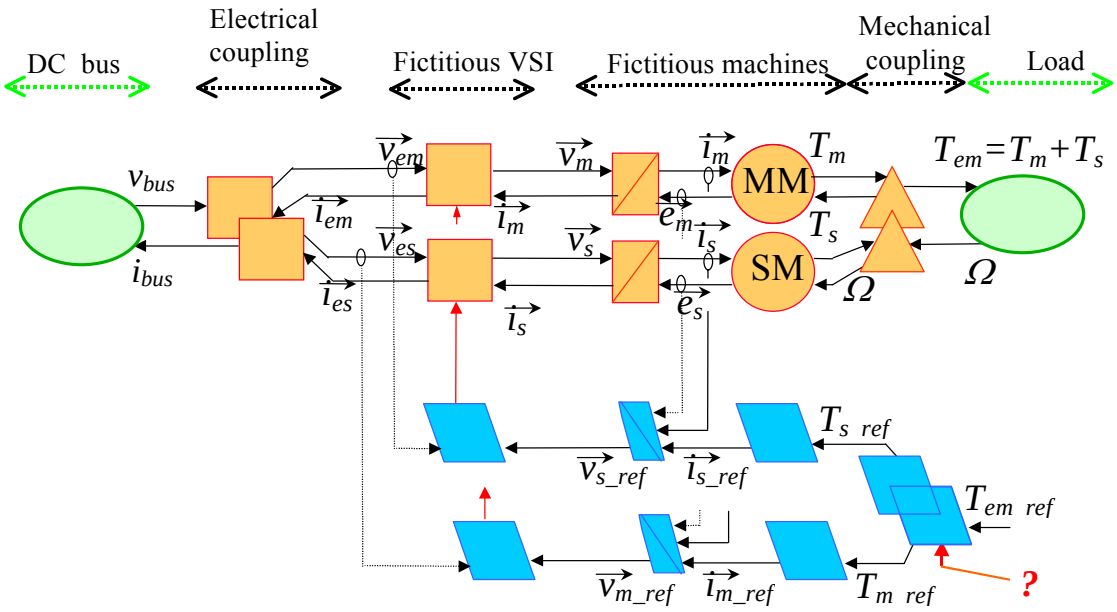


Figure 12: REM avec structure de commande obtenue par inversion (extrait de [CI10])

En résumé, la représentation graphique a permis de libérer l'imagination et de généraliser des concepts déjà préexistants pour les entrainements électriques triphasés.

Cette approche Multimachine a été développée et diffusée au sein des GDR SDSE et ME2MS [CD2][CD3][CD4][CD5][CD6][CD7][CD8], dans des manifestations organisées par le laboratoire L2EP [M1][M2]. Au niveau international, la diffusion s'est faite dans de nombreux articles de congrès [CI4][CI6][CI8][CI9][CI10][CI12][CI14][CI17][CI23][CI31]. Elle a fait l'objet d'une collaboration avec E. Levi de l'Université de Liverpool dans le cadre de l'alimentation de deux machines synchrones pentaphasées couplées électriquement de façon spécifique (voir Figure 13) pour garantir un contrôle indépendant des deux couples malgré l'utilisation d'un seul onduleur [CI13]. Ainsi l'approche REM Multimachine a pu :

- d'une part, mettre en évidence visuellement (voir Figure 14) les conditions nécessaires, en termes de contenu harmonique de force électromotrice, pour que les deux machines puissent être simplement commandées de façon indépendante grâce au couplage spécifique ;
- d'autre part, proposer une remédiation par la commande (voir Figure 15) si les conditions ne sont pas vérifiées, à savoir si les forces électromotrices ne sont pas sinusoidales.

Cette application de la représentation Multimachines relative à la mise en série de deux machines pentaphasées avait par ailleurs été présentée au sein du GDR dans [CD3] puis [R11].

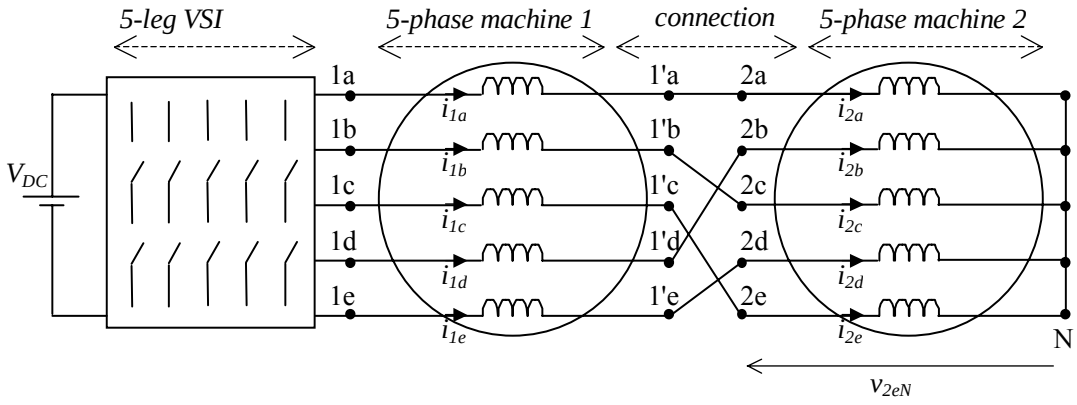


Figure 13: structure comportant un onduleur à 5 bras et deux machines pentaphasées indépendantes (extrait de [CI13])

Par contre la diffusion dans le cadre de revues a été limitée à des revues à caractère plutôt théoriques européennes [R5][R11]. Il apparaît difficile de convaincre les spécialistes du domaine des entrainements électriques polyphasés de l'intérêt du développement d'un nouvel outil de représentation. En effet, les spécialistes considèrent en général que s'il est possible de résoudre un problème avec les outils existants, il n'est pas nécessaire d'en développer de nouveaux. Un nouvel apprentissage de l'outil est alors en effet nécessaire. C'est dans le cadre d'une commande en mode dégradée originale issue directement de l'approche Multimachine que cette dernière a été tolérée dans une revue de type IEEE Transaction Industrial Electronics [R14] ou encore dans le cadre d'une conception multicritères où l'aspect synthétique devenait important [R15].

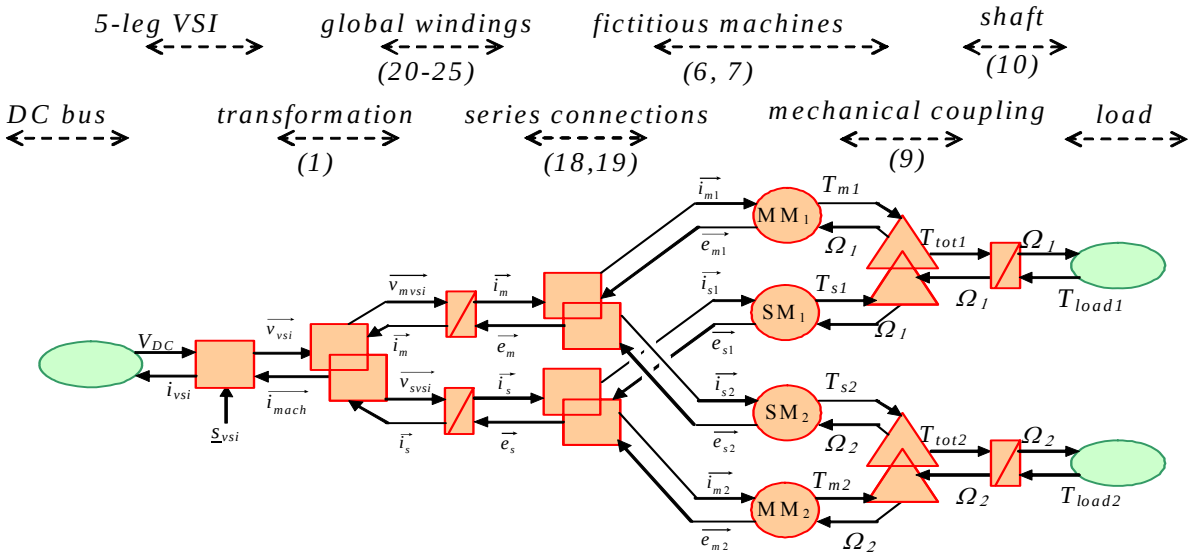


Figure 14: représentation REM de la structure de la Figure 11 (extrait référence [CI14])

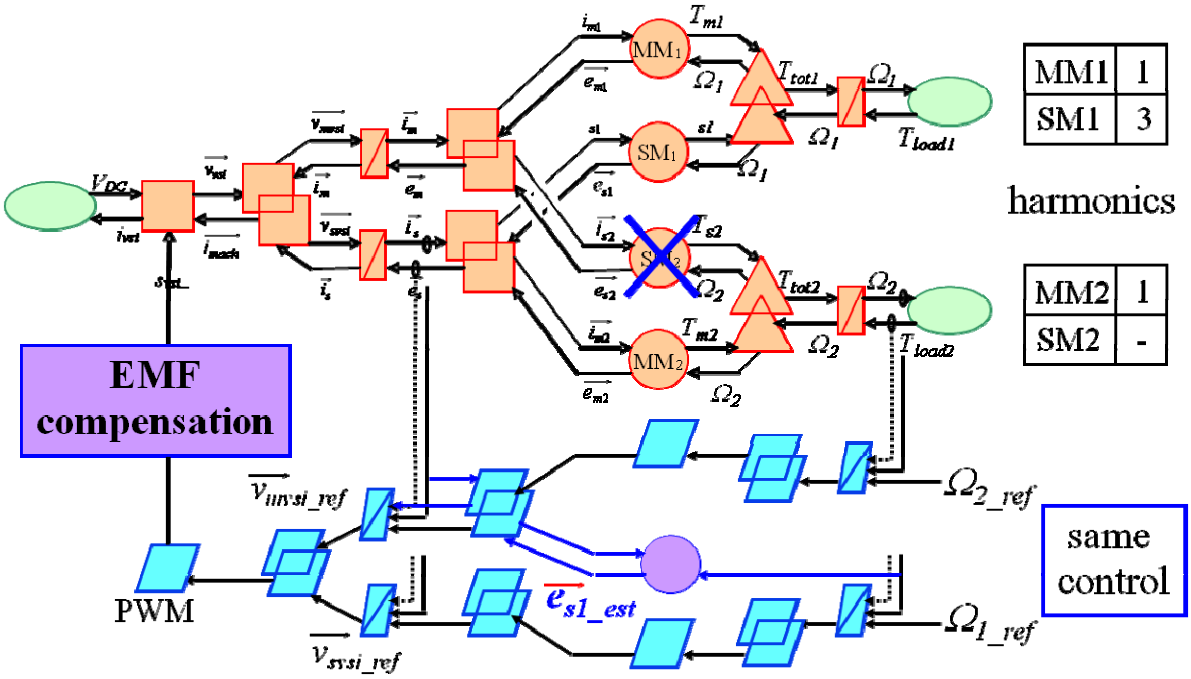


Figure 15: structure avec commande de la Figure 12 (extrait de [CI13])

25. Du modèle Multimachine vers la conception système

La culture de progrès, bien présente dans le domaine de recherche des sciences de l'ingénieur, privilégie naturellement la présentation des avantages et des performances offertes par les nouvelles technologies, par les nouveaux concepts. Cette démarche « positiviste » tend à masquer les inconvénients associés. La littérature, même scientifique, n'offre à ce titre qu'une vision déformée de la réalité. On se situe en effet pratiquement dans un domaine concurrentiel où le savoir-faire permet de conserver un avantage dans la distillation des résultats. Dans ce contexte, la fourniture de règles prudentielles génériques simples de conception n'est pas forcément adéquate puisqu'échappant à cette logique concurrentielle.

Dans ce cadre, l'expérimentation réelle est incontournable puisqu'elle nourrit les modèles en mettant en évidence leur insuffisance qui apparaissent rarement dans les articles. Elle permet également de mettre en exergue pour un système les endroits où se situent les non–linéarités qui limitent les performances globales notamment du fait des contraintes énergétiques.

La première expérimentation de nos travaux s'est faite dans le cadre de la thèse de Xavier Kestelyn [T2]. Afin de tester le modèle multimachine, une machine pentaphasée prototype à aimants permanents a été conçue. Quelques échanges avec l'équipe du LEEPCI, notamment P Viarouge et J Cros, ont permis de développer avec l'entreprise Radio-Energie ce prototype (voir Tableau 4). Lors de

la mise en œuvre du contrôle vectoriel de la machine il s'est avéré que l'harmonique de rang 7 qui ne représentait pourtant que 5 % du fondamental avait un effet important sur les ondulations de couple [CI10]. Le modèle Multimachine permettait d'expliquer facilement le phénomène et proposait des remédiations par actions sur la commande (voir Tableau 5). Si les corrections par la commande donnent expérimentalement de bons résultats dans le domaine des basses vitesses, elles montrent classiquement leurs limites lorsque la vitesse augmente, les déphasages parasites devenant prépondérants. Ce type de phénomènes, mis en évidence dans le cadre de commande de machines à réluctances triphasées [181] est un des points faibles des machines polyphasées.

Tableau 4 : Eléments de l'entrainement pentaphasé développé dans la thèse de Xavier Kestelyn (extrait de [CI9])

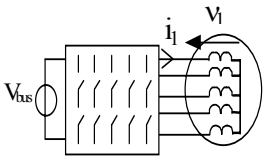


Figure 16: synoptique entrainement

Figure 17: rotor/stator

Figure 18: banc expérimental

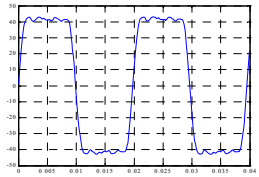


Figure 19: force électormotrice

Tableau 5 : Mise en évidence de l'impact disproportionné de l'harmonique de rang 7 et remédiation par la commande (extrait de [CI10])

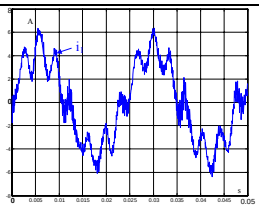


Figure 20: Courant de phase sans compensation de l'harmonique 7

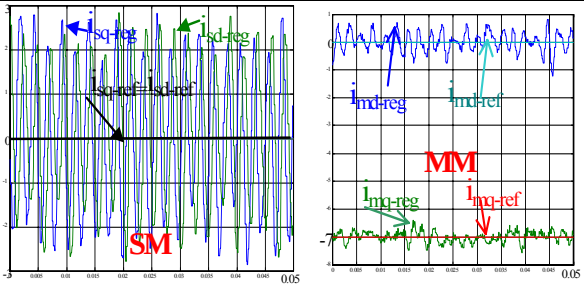


Figure 21: projection du courant dans la machine principale MM et la machine secondaire SM mettant en évidence l'impact de l'harmonique 7 dans SM visible Figure 20

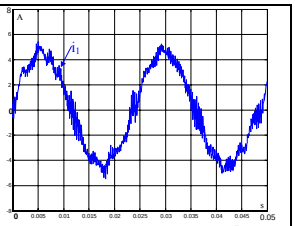


Figure 22: Courant de phase avec compensation de l'harmonique 7

Cette constatation montrait de façon forte une particularité des machines polyphasées : celle des familles d'harmoniques associées aux machines fictives. Ainsi pour la machine pentaphasée l'harmonique 7 n'appartient pas à la même famille que le fondamental. Il n'y a pas de sens à comparer l'amplitude de l'harmonique de rang 7 à celle du fondamental. Par contre l'harmonique de rang 3 appartient à la même famille que le 7 : le ratio H7/H3 étant de l'ordre de 17% dans le prototype étudié, cela explique l'impact fort de l'harmonique de rang 7.

Il s'en déduit de cette expérience que cette décomposition en machine fictive avec caractérisation par famille d'harmonique ne doit pas seulement être assimilée par les spécialistes de la commande mais également par les concepteurs de la machine.

On peut généraliser une règle de conception bien connue pour les machines triphasées à aimants permanents. Cette règle consiste en une recherche de force électromotrice dont le spectre ne contient qu'un seul harmonique[21]. Une autre formulation équivalente de cette règle est que le nombre d'harmoniques significatifs doit être inférieur au nombre de phases [126]. Lorsqu'une machine triphasée vérifie cette règle il est aisé, grâce à une commande vectorielle, de garantir un couple à très faible taux d'ondulation. La généralisation consiste à requérir la présence d'un seul harmonique par machine fictive. En l'occurrence dans le cas du prototype étudié la présence simultanée des harmoniques de rang 3 et 7 dans des proportions notables impliquait la non-vérification de cette règle.

Une première conclusion faisant suite à la thèse de Xavier Kestelyn, est la mise en évidence de particularités pour les machines polyphasées qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de la conception [CI9][CI10]. Les contraintes de commande agissent sur les contraintes à imposer au concepteur de la machine : il est donc bien question de concevoir un système et non uniquement, comme cela s'est fait souvent pour les machines triphasées, de définir des commandes qui s'adaptent à une machine optimisée au sens énergétique.

Ces particularités peuvent se décliner en termes de contraintes mais aussi d'opportunités. Ainsi pour une machine à 5 (resp 7) phases on peut obtenir un contrôle du couple de très haute qualité malgré la présence simultanée des harmoniques 1, 3, 5 (resp. 1, 3, 5, 7) : cela diminue les contraintes au niveau de la conception du rotor à aimants permanents et des bobinages. Par contre, il faut considérer de nouveaux ratios faisant perdre la prééminence du premier harmonique: pour une machine pentaphasée (resp. heptaphasée) les ratios à maitriser sont H9/H1 et H7/H3 (resp. H13/H1, H11/H3, H7/H5).

A ce premier résultat, lié à l'observation de la qualité du couple obtenue dans le cadre d'une commande vectorielle, s'ajoute une autre constatation mise en évidence également dans [161] dès le début de l'étude des machines polyphasées alimentées par onduleur de tension commandés en

[21] En fait on peut aussi accepter la famille d'harmonique lié à la machine homopolaire, à savoir les multiples de 3 pour une machine triphasée

Modulation de Largeur d'Impulsions. Cette constatation concerne la présence de courants parasites (liés à la commande par MLI) d'amplitude « inhabituelle ». En effet, dans le cas des machines triphasées, l'amplitude des courants liés à la commande par MLI est déterminée par le ratio, que l'on nommera ***MLIT,*** entre la période de la porteuse de la MLI et la constante de temps électrique de la machine diphasée équivalente. Dans une machine polyphasée, il faudra considérer les constantes de temps de chaque machine fictive et non uniquement celle de la machine liée au premier harmonique. Ce point permet de mettre en évidence à nouveau cette spécificité forte des machines polyphasées : la dépendance entre conception et commande. Considérons par exemple que le concepteur réalise une machine polyphasée ne comportant que le fondamental et aucun autre harmonique : cette machine pourrait être considérée comme parfaite du point de vue du concepteur mais aussi du point de vue du commandeur qui s'intéresse à la qualité du couple. Et pourtant, si cette machine présente une constante de temps très faible pour l'une de ses machines fictives, alors elle risque de ne pouvoir être concrètement alimentée par un onduleur de tension commandé en MLI. En effet, technologiquement la période de MLI ne peut descendre en dessous d'une certaine limite : cela est lié essentiellement aux composants de l'électronique de puissance. Cette période minimale peut tout à fait être assez petite pour la machine fictive qui est associée au premier harmonique et dont la constante de temps est la plus grande. Par contre cette période pourra être trop grande par rapport à la constante de temps d'une autre machine fictive. Des courants « parasites » d'amplitude « inhabituelle », au vu d'une approche ne considérant que la constante de temps électrique de la machine principale, peuvent alors être introduits. C'est, à ce niveau, l'électronicien de puissance devant réaliser la commande rapprochée qui aura des problèmes puisque les courants instantanés sont alors bien plus élevés que les courants moyens : cela mène à un surdimensionnement des interrupteurs de puissance.

Une deuxième conclusion est qu'il est donc nécessaire au concepteur de l'entrainement éléectrique d'intégrer dès la conception de la machine certaines contraintes liées à l'alimentation par convertisseur statique d'électronique de puissance.

Ainsi une machine polyphasée considérée comme parfaite pour une alimentation par commutateurs de courants (pont à thyristors classiques) peut s'avérer comme inadéquate pour une alimentation par onduleur de tension. La maitrise des constantes de temps des machines fictives devient une contrainte forte de la conception si on veut alimenter par onduleur de tension MLI. Bien

entendu, il est toujours possible, pour augmenter les inductances, de rajouter des filtres spéciaux entre l'onduleur de tension et la machine électrique [103] ou encore tout simplement des inductances. Le poids, le volume, les pertes associées ne constituent pas des éléments favorables.

Cette interdépendance encore plus forte dans le cas des machines polyphasées entre conception et commande mène à considérer le terme de macro-conception.

Précisons ce que nous entendons par macro-conception. Durant les dernières décennies, la tendance a été de considérer qu'il était possible par la commande de corriger, de compenser les non-linéarités présentes dans les machines. Ainsi, il est possible avec une machine triphasée à force électromotrice non sinusoidale d'obtenir théoriquement un couple sans pulsation. Dans la pratique, on se heurte aux limitations énergétiques de l'onduleur de tension, aux limitations de bande passante des interrupteurs et des correcteurs. Et même, s'il est pratiquement possible de répondre avec les moyens technologiques du moment, la solution peut ne pas être optimale si d'autres critères tels le cout ou le rendement énergétique sont pris en compte. Ce sont ces limitations technologiques qui pratiquement dictent avant tout la contrainte d'une force électromotrice sinusoidale en triphasé. Le concepteur peut donc être amené à repenser la conception de la machine afin qu'elle satisfasse à des contraintes d'alimentation et de commande après avoir effectué l'analyse du système complet alimentation-commande-machine. C'est cela que nous entendons par macro-conception.

Si on adopte, pour les entrainements électriques à plus de trois phases, la démarche plus classique de conception d'un entrainement électrique triphasée alors on risque de devoir faire de la rétro-conception, c'est-à-dire qu'il faudra reprendre la conception de la machine électrique afin de l'adapter aux contraintes de l'alimentation par électronique de puissance et aux contraintes de la commande.

Dans le cas des machines polyphasées, cet aspect « Conception Système » s'avère particulièrement aigue du fait des deux phénomènes développés précédemment.

Ces constatations nous ont amenés à développer ce volet de conception dans les thèses de Fabrice Locment [T3] et de Franck Scuiller [T4] en collaboration avec l'IRENav. Cet aspect de macro-conception justifiant mon appartenance pendant ces années à deux équipes du L2EP : l'équipe Modélisation MECOSYEL et l'équipe Commande CEMASYC.

Dans sa thèse, Franck Sculiller s'est attaché à développer des outils théoriques et logiciels dont l'objectif est de maitriser deux points principaux :

1>la répartition des harmoniques entre les différentes machines sur des considérations liées au couple (couple massique et pulsations de couple) : action sur le rotor de la machine à aimants permanents et sur son bobinage [CI15][CI20]

2>la maitrise des constantes de temps électriques par action sur le bobinage [CI22][CN6][CI20] [R15]

Dans le cadre de cette thèse, le concept Multimachine a été étendu au niveau de la machine elle-même, en introduisant les notions de bobinages fictifs. Par ailleurs, l'objectif de réalisation d'outils logiciels a amené à définir un outil de description et de modélisation qui allie la concision de l'approche vectorielle à celle très pratique de l'approche matricielle. Cet outil se base sur la notion mathématique bien connue de transformée de Fourier discrète (TFD) et prend en compte la discrétisation spatiale liée à l'encochage. L'approche est résumée en Figure 23. Plusieurs machines à aimants permanents ont été conçues à partir du modèle analytique puis simulées par méthode numérique de calcul de champ. Il a été montré que des structures triphasées pouvaient être améliorées en adaptant légèrement le nombre de pôles et le nombre d'encoches [R10][CI20][CI15][CI22][R15][T4]. On trouvera en annexe 2 quelques compléments sur les travaux de publication effectués dans le cadre de cette thèse.

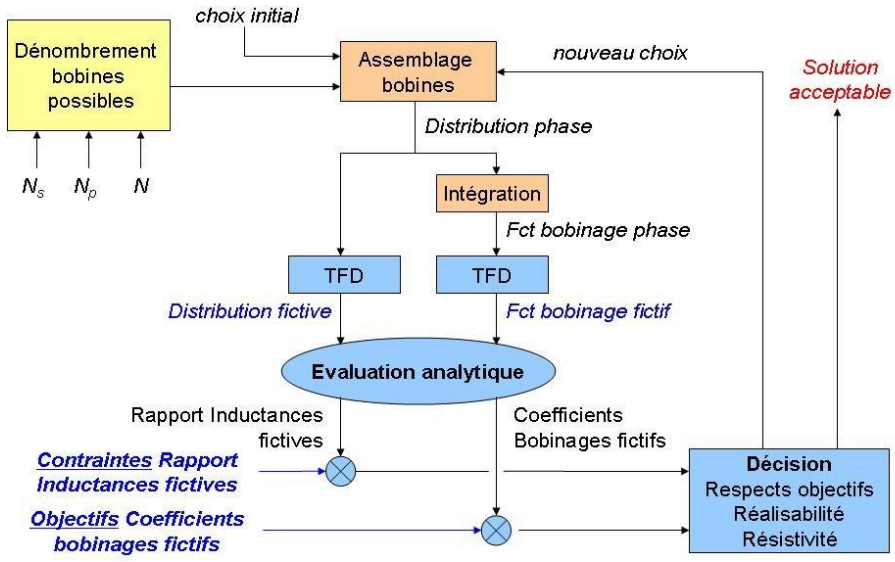


Figure 23: extrait de [T4], recherche d'une machine en utilisant la Transforme de Fourier Discrete afin d'obtenir les inductances et fonctions de bobinage des machines fictives

Dans la thèse de Fabrice Locment, l'objectif était plus de mettre en évidence la problématique de macro-conception en prenant comme problème à résoudre celui de la maitrise du couple en mode dégradé. L'analyse du comportement de la machine pentaphasée développée pour la thèse de Xavier Kestelyn avait permis d'imaginer une machine à 7 phases présentant des particularités harmoniques la rendant apte à une commande en mode dégradé aisée et robuste. Une machine à sept phases a donc été conçue et modélisée. Elle a été fabriquée par la société SELEM au Quebec. L'implantation du contrôle vectoriel en mode normal puis dégradé a permis de justifier le concept original de commande déduit de la modélisation vectorielle de la machine. Cette machine à flux axial à double rotor et stator à poudre de fer dont le caractère tridimensionnel a nécessité l'utilisation de la version 3D du code CARMEL pour sa modélisation, est typiquement l'exemple de machine dont la géométrie impose l'utilisation de bobinage simple. Par ailleurs ce prototype s'inscrivait dans le cadre du projet FUTURELEC2 dans l'opération en lien avec Jeumont/AREVA qui développait des machines à flux axial pour éolienne. La problématique de la qualité du couple à basse vitesse pour une machine se situant dans une nacelle étant importante, il est alors nécessaire, lorsque les bobinages ne peuvent pas bien filtrer les harmoniques à l'origine de couple pulsatoire, soit de définir des géométries complexes pour les aimants du rotor [163], soit d'adopter une structure polyphasée (cas des éoliennes à six phases ENERCON E40 600 KW ou de l'éolienne à 5 phases de KESTREL 2,5 kW avec machine à flux axial). Se situant dans la perspective d'une utilisation offshore, un nombre élevé de phases doit permettre d'augmenter la tolérance aux pannes des composants de puissance à la condition de maitriser les couples pulsatoires qui surviennent en mode dégradé. Un des objectifs de la thèse était de prouver cette possibilité [R13][R14][CI18][CI23]. L'approche Multimachine a permis de dégager une approche originale pour traiter le problème de phases non-alimentées. En effet, lorsque des phases ne sont plus alimentées on perd des degrés de liberté au niveau de la commande : on peut alors considérer, comme dans [172], qu'il est nécessaire d'introduire une nouvelle transformation (matrice [4X4] lorsqu'une phase de la machine pentaphasée n'est pas alimentée dans [172]). Cette façon de résoudre le problème vient d'une approche considérant le nombre de degrés de liberté : c'est l'approche la plus répandue notamment dans la culture « automatique » (liée à celle de commandabilité). En fait, le postulat que nous avons fait est que la machine est inchangée et que l'on conserve donc le même modèle. Certes, le nombre de variables commandables change en fonction du défaut, par contre le nombre de variables d'état ne change pas. L'approche vectorielle a permis de déduire rapidement des consignes de courant générant des consignes de tension adéquates.

On trouvera en annexe 3 quelques compléments sur les travaux de publication effectués dans le cadre de cette thèse.

En résumé :

- ***Une généralisation de la répartition en familles d'harmoniques a été réalisée ;***
- ***Une mise en évidence des particularités (points sensibles) des machines polyphasées a été développée : pulsations de couple si plusieurs harmoniques par machine fictive, courants parasites si constantes de temps trop faibles de certaines machines fictives ;***
- ***Une démarche de « macro-conception » a été amorcée en concevant une machine tenant compte d'une contrainte de fonctionnement en mode dégradé INDUITE par la commande.***

26. Limites et extension des modèles

Les travaux relatifs aux trois premières thèses co-encadrées considéraient que les machines étaient linéaires du point de vue magnétique et sans effet de saillance : machine à pôles lisses non saturée. De fait, une des pistes dans la poursuite des travaux pouvait être la prise en compte des phénomènes de réluctances variables et des phénomènes de saturation magnétique.

Que se passe t il lorsque la machine ne vérifie plus ces conditions ? Que faut-il faire ?

L'idée forte que nous avons choisie pour aborder cette problématique est de considérer que ces phénomènes sont du second ordre. On conserve a priori le modèle développé sans tenir compte de ces phénomènes et on considère que des couplages parasites seront apportés par la saturation et la saillance.

Une première partie d'étude est alors d'analyser l'impact de ces phénomènes afin de savoir s'ils peuvent être compensés si nécessaire par la commande et ceci avec quel cout énergétique (surdimensionnement éventuel par exemple du convertisseur d'électronique de puissance).

L'opportunité d'explorer cette problématique est apparue dans le cadre d'une thèse en partenariat avec VALEO. Une veille technologique pour cette société relativement à l'intérêt que pouvaient offrir les machines polyphasées dans le domaine des faibles tensions a mené à l'encadrement de la thèse d'Antoine Bruyère. La thématique de la thèse était la caractérisation et la commande d'une machine à griffes à 7 phases développée par la société VALEO. Cet entrainement

est un alterno-démarreur permettant de conférer la fonctionnalité Stop-Start (Micro-hybridation) à des automobiles de forte cylindrée.

Les conditions usuelles de fonctionnement de ce type de machine faisant intervenir des phénomènes de saturation et de réluctance variable au second ordre, s'offrait donc l'opportunité de tester, d'étendre et d'adapter le formalisme précédemment développé.

Par ailleurs le type de bobinage à pas fractionnaire du prototype étudié était également différent de celui à pas entier diamétral des deux prototypes développés dans le cadre des thèses de Xavier Kestelyn et de Fabrice Locment. Son étude et sa caractérisation dans le cadre du formalisme Multimachine pouvait apporter un éclairage au concepteur VALEO. Avec ce bobinage à pas fractionnaire, il ne suffit plus de considérer seulement les harmoniques (du fondamental électrique). Il faut également considérer les harmoniques (du fondamental mécanique défini par le bobinage). Dans les approches classiques on parle alors de sous-harmoniques (du fondamental électrique)

Il a été examiné dans le cadre du prototype étudié comment se répartissait les sous-harmoniques d'espace induits par le bobinage dans les différents sous espaces introduits dans l'approche Multimachine. Il a été mis en évidence, par une approche complémentaire à celle développée dans la thèse de Franck Scuiller, comment ces « sous-harmoniques » permettaient de répartir le flux entre les différentes machines fictives de façon à obtenir des constantes de temps du même ordre de grandeur pour toutes les machines fictives et cela malgré un couplage magnétique entre les phases. Par ailleurs, il apparait que, contrairement au cas des machines triphasées pour lesquelles ces bobinages à pas fractionnaires impliquent la présence de sous harmoniques d'amplitude importante, difficiles à gérer par rapport aux problèmes de vibration, l'utilisation d'un nombre élevé de phases implique automatiquement que le premier harmonique « électrique » interagira avec moins d'harmoniques de rang faible réduisant ainsi les vibrations. Par ailleurs, les harmoniques de rang faible se répartissant sur les machines fictives, il est possible, si cela est nécessaire, de réduire les vibrations en imposant, par la commande, des courants nuls dans ces machines fictives. Il n'y aura ainsi pas de couples pulsatoires dus à une interaction courant/force électromotrice dans ces machines. Une commande tenant compte de cet aspect a permis, dans la thèse d'Antoine Bruyere, de réduire le bruit créé par la machine à certaines vitesses.

Par ailleurs la diminution des couples pulsatoires va de pair avec celles des ondulations du courant du bus continu. En effet, si on néglige grossièrement les pertes et que l'on considère

constants la tension de batterie et la vitesse de rotation alors les harmoniques du courant du bus continu sont les mêmes que ceux du couple pulsatoire. Réduire les couples pulsatoires permet donc de réduire la taille des éléments de filtrage (capacité) qui protègent la batterie.

Enfin, un autre volet examiné dans le cadre de la thèse a été celui des effets de perméance variable. Il a été mis en évidence que le concept de machines fictives n'était plus alors parfait. En effet, des couplages entre machines fictives apparaissant alors, il n'est guère possible de séparer rigoureusement les flux énergétiques. Par contre, il est toujours possible de considérer que ce couplage est faible (sauf dans le cas d'une machine à réluctance pure bien évidemment). Il a été montré également que l'étude dans les bases de travail définies par l'approche Multi-machines permettait tout de même de simplifier fortement le problème de la commande en permettant une répartition claire des harmoniques.

En résumé, on a examiné :

- ***L'impact sur la répartition des familles d'harmoniques d'un bobinage à pas fractionnaire ;***
- ***L'impact de phénomène de réluctance variable et de saturation.***

Approche vectorielle et onduleurs de tension multi-bras

27. Une modélisation indépendante de la charge

L'approche vectorielle des onduleurs de tension multi-bras a été initiée dans [T1][R1][R2][CI1] et s'est poursuivie essentiellement dans la thèse de Xavier Kestelyn [T2][CI3][CI4]. L'originalité forte de cette approche est le développement d'une modélisation de l'onduleur indépendante de la charge qu'il alimente. Cette approche permet ainsi de bien mettre en évidence les degrés de liberté de l'onduleur pour la commande.

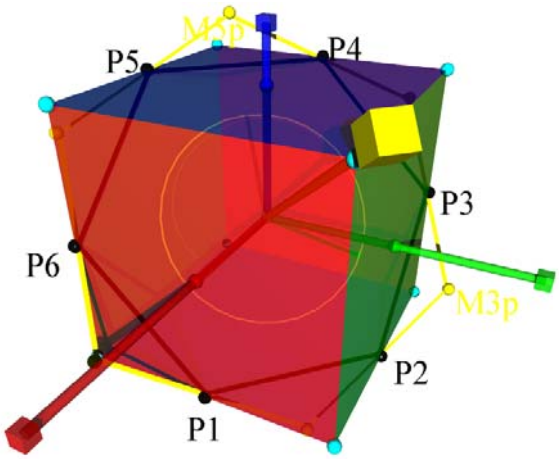


Figure 24: représentation de l'onduleur à trois bras par un cube en faisant apparaître par projection les hexagones "classiques" de Figure 10 (extrait de [T1])

Un onduleur de tension à trois bras est alors caractérisé par un cube (voir Figure 24) alors que l'approche classique des phaseurs complexes le représente par un hexagone plan centré. Cette différence s'explique par le fait que dans le cas

classique on suppose que la charge triphasée est couplée en étoile ou en triangle. En représentant l'onduleur par un hexagone, on ne fournit en fait qu'une représentation de l'onduleur vu de sa charge : cette vue partielle oblige à reconsidérer complètement le problème lorsque ce même onduleur doit alimenter, par exemple, une charge couplée en étoile dont le neutre est sorti : la dimension de la charge passe alors de deux à trois et la représentation de l'onduleur par un hexagone n'est plus valable. C'est dans ce contexte que de nombreux auteurs [217][100][101][109] ont rajouté une dimension au plan contenant l'hexagone représentatif de l'onduleur menant à des représentations très différentes du cube proposé dans nos travaux, représentations non généralisables. D'autres auteurs, par une approche matricielle [168][109], aboutirent exactement à la même représentation que dans celle introduite dans nos travaux [T1] [R2] [CI1] dans un contexte par contre par nature polyphasé[22] et donc extensible immédiatement au cas d'un onduleur à n-bras.

Par ailleurs, cette représentation vectorielle est également bien adaptée à la synthèse de la commande par les méthodes d'inversion causales utilisées au L2EP. En effet, l'élaboration de la commande des machines électriques par inversion permet de dégager des vecteurs de consigne en tension directement associés à la machine. Ainsi pour une machine triphasée couplée en étoile, on obtient un vecteur comprenant deux composantes dans le plan complexe. Or la représentation de l'onduleur par un cube met en évidence que le vecteur de commande de l'onduleur appartient en fait à un espace de dimension 3. Il faudra par conséquent ajouter une composante au vecteur de dimension 2. On dispose de ce fait d'un degré de liberté au niveau de la commande afin de l'optimiser par différents critères : utilisation optimale de la tension de l'onduleur par injection de courant homopolaire ; minimisation du nombre de commutation en travaillant sur la surface du cube ; minimisation des courants parasites de mode commun en réduisant les tensions de mode commun ; etc…

Si pour la commande d'onduleurs à trois bras ces résultats peuvent s'obtenir avec les outils classiques la généralisation au système multi-bras n'est pas aisée. L'approche vectorielle se prête par nature à cette généralisation.

[22] On pourrait penser à l'Allégorie de la Caverne (paragraphe ' d'étranges prisonniers') de Platon où des prisonniers percevaient la réalité par uniquement l'observation d'ombres projetées (l'hexagone) d'une réalité de dimension supérieure (tridimensionnelle). En cela l'approche vectorielle doit permettre par sa nature multi-dimensionnelle intrinsèque d'aborder des problématiques générales.

Ceci étant, les travaux de recherche concernant la commande des onduleurs multibras n'a pas été privilégiée durant la période 2004-2008. En effet, nous avons donné dans [R9], avec un exemple d'application à une commande de machine pentaphasée, un algorithme efficace de calcul des durées de conduction pour une commande en temps réel. Si on négligeait les phénomènes non-linéaires de saturation de l'onduleur il n'y avait plus en 2004 de problèmes importants et bloquants à résoudre pour une commande aux valeurs moyennes.

Par contre, la prise en compte des saturations de l'onduleur au niveau de la commande n'a pas été traitée de façon générale. Néanmoins deux articles ont été consacrés à l'utilisation d'onduleurs multibras : l'un [CI12] pour mettre en évidence comment optimiser l'utilisation de la source de tension continue dans le cadre d'une commande de machine à 7 phases (voir Tableau 6) ; l'autre [CI25] pour mettre en évidence l'impact du nombre de phases dans le cas d'une commande pleine onde. L'intérêt d'augmenter le nombre de phases se situe tant, dans la réduction des ondulations de courant du bus continu et dans celles corrélées du couple, que dans l'utilisation optimale de la source de tension continue.

Tableau 6 : recherche, pour une machine heptaphasée, d'une fem comportant les harmoniques 1 et 3 permettant d'optimiser l'utilisation du bus de tension et de fournir un couple supplémentaire grâce aux harmoniques 3 de courant (extrait de [CI12])

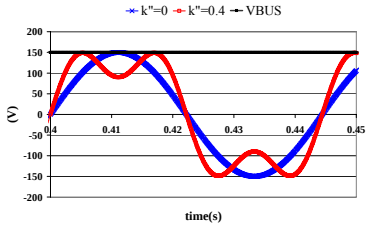


Figure 25: tension comportant harmonique 1 et 3 permettant d'optimiser l'utilisation du bus continu

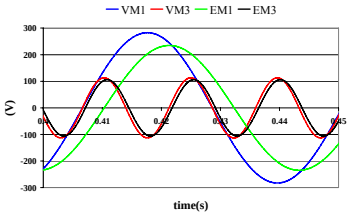


Figure 26: tension et force électromotrice dans chaque machine fictive

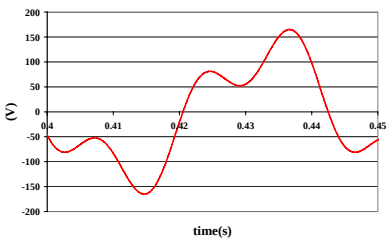


Figure 27: force électromotrice optimale pour un point de fonctionnement ne comportant que des harmoniques 1 et 3.

Tableau 7: impact du nombre de phases dans le cadre d'une commande pleine onde (extrait de [CI25])

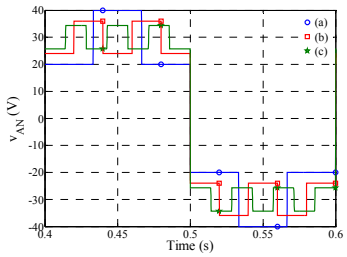


Figure 28: tension phase-neutre pour 3, 5 et 7 phases

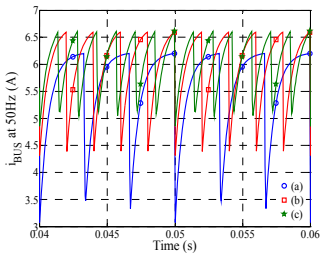


Figure 29: courant de BUS pour 3, 5 et 7 phases

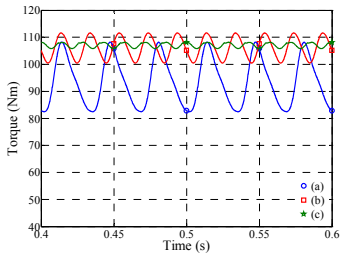


Figure 30: couple pour 3, 5 et 7 phases

Un des points bloquants relativement au développement du phénomène de saturation était la nécessité de disposer de moyens de calcul puissants pour l'implantation temps réel dans le cadre des machines polyphasées à notre disposition. Cet élément signifiait que la technologie n'était pas encore mûre pour l'application pratique de ces problèmes de saturation dans le cadre de commande de machines en boucle fermée. Par ailleurs, cette même limitation technologique limitait le développement de commande s'affranchissant de la notion de « valeur moyenne ». Travailler en valeur instantanée, en jonglant avec le nombre de vecteurs « tension » disponibles pour réaliser la commande (2^n pour n phases), devrait pouvoir permettre de réduire au maximum les pertes par commutation ou tout simplement rendre accessible à l'électronique de puissance des machines de très fortes puissances.

On trouvera en annexe 1 un résumé de cette approche vectorielle reprise dans [O3]. On retiendra :

- ***Un onduleur à n-bras est modélisé par un hypercube de dimension n ;***
- ***Une commande aux valeurs moyennes permet d'obtenir tout vecteur dont l'extrémité se situe à l'intérieur de l'hypercube ;***
- ***Une commande aux valeurs instantanées ne travaille qu'avec les sommets de l'hypercube [CI1];***
- ***Les durées d'activation d'un vecteur tension accessible en utilisant k sommets de l'hypercube sont les coordonnées barycentriques du vecteur (les durées étant positives seules les coordonnées barycentriques positives sont possibles).[CI1]***

28. Un modèle vu de la charge : modèle multi-convertisseur

La charge considérée de l'onduleur multi-bras est une machine polyphasée. On a vu que l'on associait à une machine un espace de dimension *n* lui-même décomposé en sous espaces. Il apparaît naturel de projeter l'hypercube de l'onduleur de tension dans les différents sous espaces. On obtient alors une représentation de l'onduleur dans chacun des sous espaces. Chaque sous espace n'a alors qu'une représentation partielle de l'onduleur. Ainsi une machine triphasée perçoit un onduleur triphasé comme 7 points (les six sommets de l'hexagone plus son centre) alors que dans la réalité le cube comporte 8 sommets mais dont les projections de deux sommets sont confondus [T1].

Si ces projections permettent de retrouver une représentation graphique classique de type phaseurs complexes développée pour les onduleurs triphasés, il n'en reste pas moins nécessaire de ne pas oublier l'interdépendance qui existe dans le principe entre les différentes projections de l'hypercube. Néanmoins il est possible, moyennant une hypothèse, de considérer que l'on dispose de convertisseurs statiques indépendants. Il suffit pour cela de négliger les phénomènes de saturation et de travailler aux valeurs moyennes: dans ce cas, la commande s'en trouve largement simplifiée. Pour obtenir le vecteur de tension de référence complet on cherchera d'abord le vecteur de tension de référence relatif à chaque convertisseur élémentaire (voir Tableau 8) et on fera ensuite la somme de ces vecteurs. Dans la pratique il faudrait vérifier que cette somme vectorielle se situe bien à l'intérieur de l'hypercube. Dans l'exemple du Tableau 8 la somme des trois vecteurs élémentaires sort fréquemment de l'hypercube sans que cela ne soit le cas dans chaque sous-espace. C'est tout particulièrement le cas lorsqu'on veut gérer les problèmes de saturation dans le cadre d'un contrôle vectoriel où ce sont les correcteurs des asservissements de courant qui délivrent les consignes de tension. Lorsque l'on s'intéresse à des commandes en boucle ouverte de type V/f constant les contraintes sont moins fortes en terme de d'algorithme de commande.

Tableau 8 : trajectoires de références dans les projections représentatives de l'onduleur dans les espaces propres de la machine électrique pentaphasée

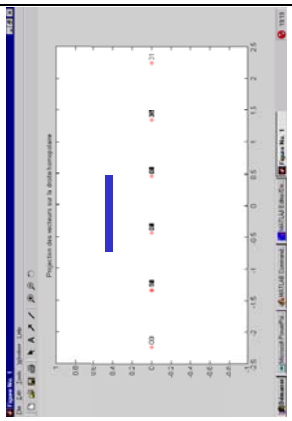


Figure 31: trajectoire sur la droite homopolaire

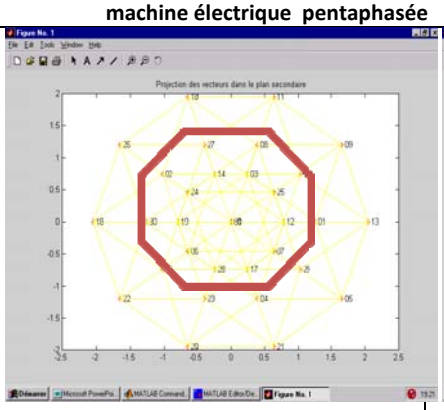


Figure 32: trajectoire dans le plan secondaire de la machine pentaphasée

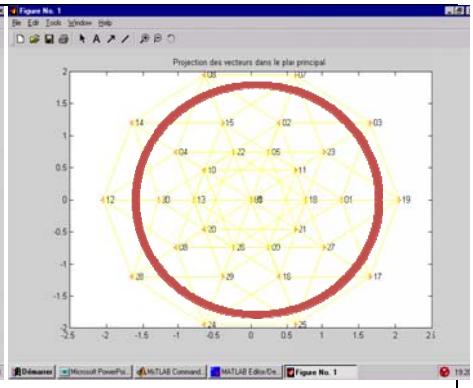


Figure 33: trajectoire dans le plan principal de la machine pentaphasée

Cette représentation de l'onduleur vu de la charge est fondamentale pour analyser les travaux opérés dans le domaine. En effet, si la représentation de l'onduleur dépend de la charge, il va de soi que la qualité du modèle de la charge est important. Ainsi, si on considère qu'une machine polyphasée est équivalente à une machine diphasée du point de vue de la production du couple, il apparaît alors dans l'élaboration d'une commande que seules deux composantes de courant comptent pour le contrôle du couple. De ce fait, seules deux composantes du vecteur tension (de dimension *n*) comptent également. Il en résulte la présence de *n-2* degrés de liberté pour la commande de l'onduleur. C'est cette hypothèse, communément utilisée pour les machines triphasées, qui a été réalisée naturellement dans nombre d'articles sur les machines polyphasées. La fixation des *n-2* composantes de tension restantes peut s'opérer de façon explicite (on impose de façon consciente ou non par exemple toutes les autres composantes à zéro) soit de façon implicite (ce sont les correcteurs des asservissements de courant qui définissent les références de tension) soit mixte[23]. S'il faut définir des courants de référence sans qu'ils n'aient d'impact sur le couple, une solution apparemment évidente est de les imposer égaux à zéro, ceci afin de réduire les pertes Joule associées. Néanmoins, ce sont alors les courants moyens qui sont imposés à zéro et non les courants instantanés. La présence de courants parasites haute fréquence liés à la MLI peut mener alors à réaliser des commandes où l'on cherche à réduire, à contrôler directement ces

[23] Dans le cas d'une machine triphasée deux composantes (v_d,v_q) du vecteur tension proviennent des consignes de courant liés au couple (id,iq) . La composante homopolaire de tension est implicitement soit imposée à zéro dans le cas de la commande triangle-sinus classique soit non nulle dans le cas de la commande par phaseur d'espace. Les composantes homopolaires de tension peuvent également être explicitement calculées (injection d'harmonique de rang trois ou d'homopolaire) afin d'optimiser par exemple l'utilisation de la tension de bus continu, de réduire le nombre de commutations (Commande Flat-Top) [76][20] ou encore de maitriser les tensions de mode commun.

courants hautes fréquences [CI4]. En fonction des constantes de temps de chaque espace propre et des forces électromotrices il faut choisir des vecteurs qui réduiront l'amplitude de ces courants parasites. Il faut donc superposer à une commande aux valeurs moyennes fournissant deux tensions pour obtenir le couple désiré une commande permettant de minimiser les courants parasites et/ou les pertes Joule. C'est ce que nous avions initié dans un article commun en collaboration avec le GREEN pour réduire l'amplitude des courants parasites [CI4].

Il apparaît que la commande de l'onduleur est étroitement dépendante des caractéristiques de la machine. Si, pour une machine triphasée, le fait de ne pas mettre à profit le degré de liberté de l'onduleur n'avait pour effet que de travailler de façon non optimale, dans le cas d'une machine polyphasée, cela peut mener rapidement à des problèmes de courants parasites insupportables (et inexpliqués avec un modèle ne prenant en compte que l'expression du couple).

En mettant en évidence qu'il y a d'une part un modèle intrinsèque de l'onduleur et d'autre part des modèles liés à la charge, nous pensons apporter une vue plus synthétique du problème…et donc à terme une vision simplificatrice.

En résumé, si la représentation de l'onduleur dans les espaces caractéristiques de la charge polyphasée est nécessaire et permet de plus de retrouver une représentation graphique et les développements réalisés pour les onduleurs à trois bras, elle ne permet pas d'avoir une représentation globale de l'onduleur. Lorsque les phénomènes de saturation d'onduleur doivent être pris en compte le modèle complet de l'onduleur redevient une nécessité. L'approche Multi-convertisseur est une approche nécessaire mais non suffisante.

L'entrainement électrique polyphasé

L'entrainement polyphasé comporte une machine polyphasée, un onduleur de tension à n-bras mais également un dispositif de contrôle du flux d'énergie ainsi que des grandeurs comme le courant ou le flux magnétique. La particularité des systèmes polyphasés par rapport au classique entrainement triphasé est que des degrés de liberté supplémentaires apparaissent apparemment au niveau de l'onduleur. En fait on retrouve généralisée la problématique de la gestion du degré de liberté supplémentaire déjà mis en évidence pour un onduleur triphasé alimentant une charge triphasée comportant seulement deux courants indépendants.

Si on se limite, comme dans le cas triphasé, à une approche au premier harmonique, alors seules deux composantes de courant suffisent à imposer le couple: de ce fait les autres composantes du courant ne servent à rien, si ce n'est à créer des pertes Joule supplémentaires. Par conséquent, il peut apparaître non nécessaire de contrôler ces composantes. Cela offre des degrés de liberté au niveau de la commande. Si on tient compte par contre des harmoniques de courant pour l'élaboration du couple, alors ces degrés de liberté, apparents, disparaissent.

Il existe ainsi de ce fait théoriquement bien plus de possibilités d'atteindre un même couple global si on compare au cas d'une machine triphasée : cela dépend du mode de répartition du couple opéré entre les différentes machines. Les choix entre ces différentes possibilités se font en fonction des caractéristiques de la machine ainsi que de critères d'optimisation. Si les caractéristiques de la machine sont figées une fois celle-ci fabriquée, les critères d'optimisation peuvent, eux, être modifiés en fonction de l'état de la machine. Par exemple, en fonctionnement normal à vitesse constante, on peut choisir d'optimiser le rendement énergétique : obtenir le couple maximum à pertes données. On peut aussi préférer travailler à facteur de puissance le plus proche possible de l'unité...etc. En régime transitoire on préférera obtenir plus de couple même si cela s'opère au détriment du rendement.

29. Contrôle vectoriel généralisé

La modélisation de l'ensemble machine/onduleur à l'aide de l'approche vectorielle a permis de mettre en évidence des sous-espaces vectoriels, sièges de flux énergétiques indépendants et de plus associés à des familles d'harmoniques particulières [CN2] [CD2] [CD3] [CD4] [CI3] [CD6] [T2] [CI9]. Ce formalisme permet de décrire de façon très concise et surtout générale (puisque le nombre de phases est la dimension de l'espace vectoriel) à la fois l'onduleur de tension et la machine électrique. Par ailleurs, la Représentation Energétique Macroscopique, avec une structuration naturellement imposée par la causalité, organise les équations qui s'agencent ainsi toutes seules.

Ceci étant, l'approche REM montre tout son intérêt lorsqu'on représente l'entrainement polyphasé dans les espaces propres mis en évidence par l'approche vectorielle. Cette représentation fait disparaitre les couplages magnétiques et les déplace d'une part du côté mécanique et d'autre part du côté électrique (voir Figure 34). Du côté mécanique, le couplage est très simple : le couple total est la somme des couples. Néanmoins, le fait d'être obligé de le représenter dans le cadre de la REM fait apparaître très clairement qu'un critère de répartition des couples entre les différentes machines fictives devra être défini lors de la commande: on ne peut plus éluder implicitement le problème, il faut y répondre. Ce critère est étroitement lié aux caractéristiques de la machine ainsi

qu'à des choix tels que l'optimisation du rendement ou l'obtention de couple supplémentaire (lors de régime transitoire par exemple).

Du côté électrique, le couplage est plus complexe. Ceci étant, il se situe également tout proche de l'onduleur de tension qui peut être piloté de façon efficace: c'est une commande adéquate rapprochée de l'onduleur qui devra être réalisée.

A partir de cette représentation REM dans les espaces propres, une structure de commande vectorielle se déduit logiquement [CI10][CI4][CI3] par une inversion, mettant en évidence clairement où se situent les choix possibles pour la commande : lorsqu'il y a couplage aval (couplage mécanique) un critère doit être défini ; lorsque le bilan énergétique passe d'un produit scalaire de deux vecteurs à un produit de deux scalaires il y a aussi des choix à réaliser. Pour ce qui est de l'implantation des correcteurs de courant, l'approche est elle, tout à fait classique.

L'utilisation de la Représentation Energétique Macroscopique sous forme Multi-Machine Multi-convertisseur permet de généraliser aisément le contrôle vectoriel bien connu dans le cas d'une machine synchrone triphasée. Dans le cadre par exemple d'une modélisation graphique avec Matlab/Simulink, il suffit pour élaborer le contrôle des différentes machines diphasées (3 par exemple dans le cas d'une machine à 7 phases) de copier la structure existante pour la machine triphasée et de la coller deux fois. Bien entendu, il y a tout de même d'autres petits aménagements : il faut remplacer la matrice de Concordia [3X3] par une matrice [nXn] dans le cas d'une machine à n-phases. L'angle des matrices de rotation n'est pas le même pour les différentes machines diphasées. Lorsqu'un harmonique de rang k est dominant dans chaque machine fictive, il est pratique de choisir comme angle de rotation $pk\theta$. Lorsque dans une machine, existe plus d'un harmonique pour la force électromotrice on retrouve alors après rotation un harmonique dominant de rang 2m si la machine ne comporte que des harmoniques de rang impair (m si la machine comporte des harmoniques de rang pairs). Cette perturbation peut être ou non compensée dans le cadre de la commande. Cette compensation sera d'autant plus difficile à réaliser pratiquement que l'amplitude à corriger est faible et que le nombre de phases est élevé (la fréquence du signal à compenser augmente avec m). On pourra préférer à cette compensation issue d'un modèle de connaissance une compensation implicite en utilisant les correcteurs résonants [CI17].

En résumé, l'organisation graphique des équations vectorielles sous forme de Représentation Energétique Macroscopique permet d'obtenir une représentation mettant en évidence clairement les différents niveaux où des critères de commande peuvent être définis.

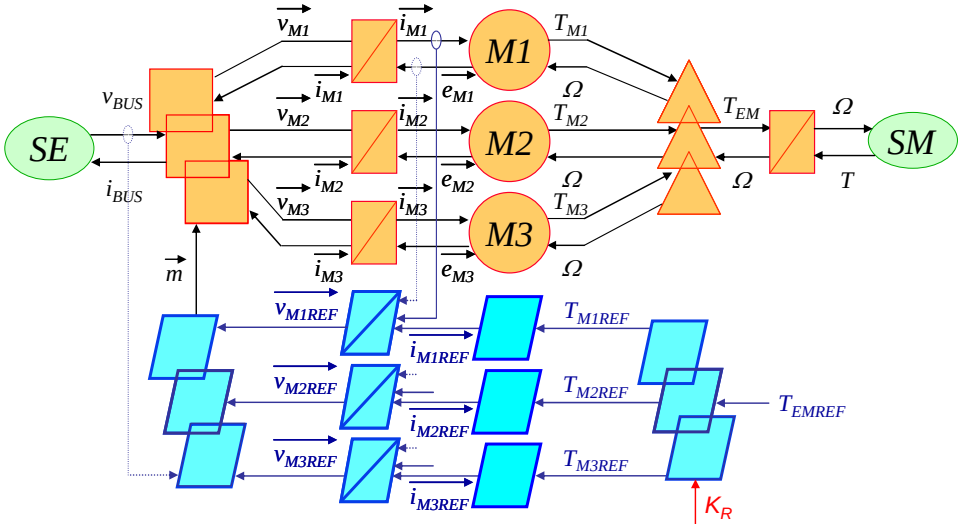


Figure 34: Modélisation mettant en évidence les couplages mécaniques et électriques et donc la nécessité d'un critère de répartition du couple entre les différentes machines fictives (extrait de [CI23])

30. Du fonctionnement dégradé à la conception de la machine

Si l'approche vectorielle permet de systématiser facilement la structure de commande vectorielle réalisée en triphasé, l'utilisation des approches plus classiques mènent à des résultats identiques en requérant néanmoins une expertise plus grande. C'est principalement dans le cadre de la commande en mode dégradé que l'approche vectorielle associée à la REM met en évidence toute sa puissance. Dans le cadre du master et de la thèse d'Yvan Crévits [M2], [CI26], [CI17] une étude a été développée sur des machines triphasées proposant une modélisation par la REM incluant un défaut potentiel (par la présence d'un fusible, voir [CI17]). L'intérêt est de disposer d'un seul modèle : la prise en compte d'une ouverture de phase est très simple. Ce faisant, des structures de commande génériques en ont été déduites et deux types de contrôle ont été expérimentés : l'un se basant sur une commande prédictive, l'autre sur l'utilisation de correcteur résonant. Par rapport aux travaux développés dans [15] [25], l'action prédictive se situe au niveau des courants et non au niveau des tensions. Cela a pour inconvénient que les correcteurs PI sont sollicités par des consignes variables : à basses vitesses, l'erreur de trainage est faible, par contre cette erreur augmente aux vitesses élevées. Cette discussion bien connue dans le cadre des contrôles vectoriels dans le repère du stator a été également mise en exergue dans le cadre du fonctionnement en mode dégradé par [129]. Nous proposons aux vitesses

plus élevées l'utilisation du correcteur résonant. Si on compare aux travaux développés dans [15][25], le fait de considérer les courants et non pas les tensions permet d'obtenir des algorithmes très performants permettant une implantation en temps réel. Cela permet également de considérer des machines plus complexes comportant plusieurs harmoniques dont il est possible de prendre en compte l'impact lors d'un fonctionnement en mode dégradé.

Initiée dans la thèse de Xavier Kestelyn [Chp3] la commande en mode dégradée a surtout été développée dans le cadre de la thèse de Fabrice Locment, dans le master puis la thèse en cours d'Yvan Crévits. L'analyse, par l'approche vectorielle, des raisons des difficultés de contrôle en mode dégradé de la machine pentaphasée prototype a permis de déduire des critères simples que devait vérifier toute machine candidate à un contrôle simple en mode dégradé. Une machine à 7 phases vérifiant ce critère a été développée [T3][R12][CI16][CI19] et une commande en mode dégradé originale a pu en être déduite [CI23][CI29][R13][R14] et vérifiée expérimentalement trois ans plus tard avec le prototype construit dans le cadre de la thèse de Fabrice Locment.

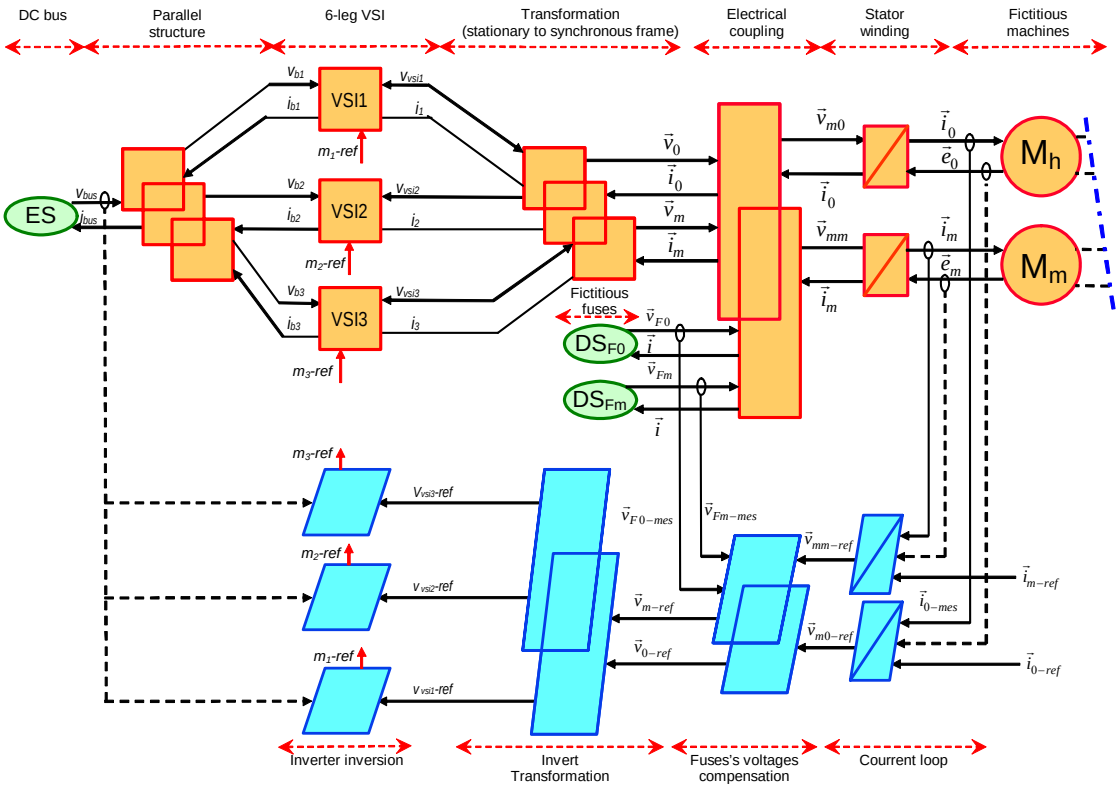


Figure 35: développement d'une commande en mode dégradé en utilisant le concept de fusible dans une REM (extrait de [CI18]).

31. Du contrôle des phénomènes du second ordre

Le concept Multimachine a été élaboré en supposant vérifiée une hypothèse de machine non saturée à pôles lisses. Dans le cadre de la thèse d'Antoine Bruyere, la prise en compte de phénomènes de réluctance variable et de saturation a été initiée. Par ailleurs, contrairement aux premiers prototypes de machines à 5 et 7 phases qui ne comportaient pas d'harmoniques de rang pair, la machine synchrone à griffes à 7 phases étudiée [CI31] dans le cadre de la thèse d'Antoine Bruyère présente des harmoniques de rang pair de force électromotrice. Les prédictions obtenues par l'approche vectorielle concernant la répartition des harmoniques pairs [T2] ont pu être vérifiées expérimentalement dans ce cas.

Dans le cadre du contrôle de l'entrainement électrique, la démarche initiée suppose que les effets de réluctance variable et de saturation seront du second ordre. Il restera légitime d'utiliser la même structure que celle développée pour la machine non saturée à pôles lisses. On considère donc que les effets de la saturation et de la perméance sont de générer des perturbations sur le modèle idéal. Il faut de ce fait choisir le plus possible des structures de correcteurs permettant naturellement de compenser ces perturbations. Dans le cadre de l'étude de cette machine, des procédures d'identification reposant sur un contrôle vectoriel ont été développées [CI31] afin de réaliser l'estimation des paramètres en étant dans des conditions proches du point de fonctionnement.

Perspectives

Les perspectives relativement au développement des travaux de recherche comportent deux volets qui se sont dégagés naturellement et enrichis depuis ma soutenance de thèse en 2000.

Le premier volet concernera les développements qu'on peut envisager concernant les entrainements électriques polyphasés et de façon plus générale concernant de nouvelles machines électriques tournantes.

Le deuxième volet concerne une problématique plus sociétale dans laquelle s'est inscrite le développement de mes travaux sur le polyphasé motivant particulièrement certains travaux sur la conception de nouveaux entrainements électriques.

Examen prospectif du positionnement des entrainements électriques polyphasés

La recherche sur les entrainements polyphasés permet d'allier la connaissance des entrainements électriques classiques pour en dépasser les limitations. A ce niveau se pose le problème des justifications du développement de nouvelles machines, de nouveaux entraînements. Quelles en sont les motivations ? Elles peuvent à notre sens s'inscrire soit dans un mode de pensée classique (celui de la société de consommation où l'énergie est quasi gratuite) soit dans un mode de pensée de la finitude (celui notamment énergétique).

Le monde de l'énergie quasi-gratuite est typiquement celui des 100 dernières années (consommation des ressources énergétiques accumulées par la terre pendant des millions d'années). C'est aussi, certains (peut être tous) au moins peuvent l'espérer, le monde futur très hypothétique d'une énergie provenant de la fusion nucléaire…ou encore, de façon plus probable, celui de la fission nucléaire dans certains pays ou de façon plus anecdotique de la géothermie volcanique[24].

Le monde de la finitude rejoint celui qui a prévalu pendant des milliers d'années dans nos sociétés humaines et auquel s'est soustrait une partie du monde pendant à peu près cent ans : ce monde est plutôt celui des énergies renouvelables.

Le futur ne sera fort probablement pas une recopie du passé…même si l'évolution des modes de pensée a sûrement été moins forte que celle du monde de la technique. En effet, les évolutions techniques des cinquante dernières années liées à une énergie gratuite (avec une valorisation

[24] L'exemple unique de l'Islande permet de mettre en évidence que la présence d'une énergie « gratuite » implique le développement du vecteur énergétique Hydrogène sans pour autant se diriger vers un développement durable.

hypertrophiée de l'information) pourront, on l'espère, permettre de mieux gérer l'avenir….sans revenir uniquement aux moulins à eau ou à vent de la Renaissance.

Dans les deux paragraphes suivants nous brossons les mutations attendues auxquelles les entraînements polyphasés pourraient modestement participer. Nous avons choisi une présentation quelque peu caricaturale que l'on justifie dans la mesure où l'on se place dans un contexte sociétal où il faut « forcer le trait » pour mettre en exergue les grandes tendances. Les réalités se situeront bien entendu entre ces extrêmes…des réalités qui dépendront d'une part du temps mais également à mon sens de l'espace puisque les problématiques ne manqueront pas de mettre en exergue les disparités régionales en termes de ressources énergétiques, ressources qui pour l'instant sont « mutualisées », au sens de l'accès, par la présence d'un marché mondial de l'énergie. Lorsque les facilités de transport du pétrole liquide feront place au transport des ressources carbones solides ou gazeuses cette fluidité dans les échanges devrait évoluer même si des « corridors » énergétiques sont petit à petit mis en place.

Dans le contexte de l'énergie gratuite sans carbone

Plaçons-nous virtuellement dans ce monde futur de l'énergie gratuite (nucléaire) et donc le monde de l'énergie électrique. On verra se développer des machines électriques naturellement adaptées à la source d'énergie majeure. Dès qu'une connexion électrique sera possible physiquement, la transformation de l'énergie[25] qui requérait de l'énergie fossile se fera par l'intermédiaire de l'énergie électrique surtout dans les fortes puissances. La recherche de la réduction des coûts de maintenance (ou encore dit de possession) verra le développement de systèmes réduisant les contacts mécaniques diminuant ainsi l'usure et améliorant le MTBF[26]. On pensera aux transports sans contacts mais avec alimentation par la terre (transport à sustentation magnétique[27] ou à induction électromagnétique) mais aussi de façon plus générale aux entrainements directs sans transmetteurs mécaniques. Les contraintes se reportant alors sur l'entrainement électrique qui sera alors très fort couple ou très grande vitesse, le talon d'Achille des entrainements triphasés deviendra alors celui de la perte d'une phase (souvent du fait des composants ou de la commande de l'électronique de puissance mais aussi du fait de la machine). L'utilisation des machines polyphasées permettra d'équilibrer les risques : une machine polyphasée présente a priori un taux de pannes plus élevé lié à l'augmentation de la connectique par contre la

[25] Electrique/mécanique ; électrique/thermique ; électrique/lumineuse ; électrique/chimique
[26] Mean Time Between Failures : la durée moyenne entre deux pannes
[27] Train, tramway, ascenseur, machine à palier magnétique,…

tolérance aux pannes du système global est accrue puisqu'il est encore possible de créer un champ tournant avec une ou plusieurs phases non alimentées. Par ailleurs, au niveau du convertisseur statique, augmenter le nombre de voies par lesquelles s'écoule le flux d'énergie permet également de réduire les contraintes subies par les interrupteurs : la fonction interrupteur peut ainsi être réalisée à partir d'un seul interrupteur et non par une mise en série[28]/parallèle[29] d'interrupteurs physiques élémentaires.

Bien entendu, la solution polyphasée ne sera pas l'unique solution. S'il est possible d'assurer la tolérance aux pannes en réalisant la transformation électromécanique avec plusieurs machines électriques l'usage des machines polyphasées ne sera pas justifiée : on peut penser par exemple aux systèmes de traction électrique multi-moteurs. Néanmoins, sachant que le couple massique et/ou volumique d'un ensemble de deux machines de X MW est moins élevé que celui d'une machine à 2X MW, l'utilisation Multi-moteur doit pouvoir se justifier par d'autres contraintes : possibilité d'augmenter le transfert énergétique[30] ; contrainte d'encombrement (par exemple l'espace disponible au niveau d'une roue) ; coût plus faible des deux moteurs par rapport au moteur unique[31] en bénéficiant de l'effet « Fabrication en série »…etc

Un autre domaine d'application des machines polyphasées sera celui des machines électriques puissantes. Dans ce cadre la poursuite de l'utilisation des machines électriques triphasées ne pourra se faire[32] qu'en augmentant la tension : c'est ce qui est fait actuellement dans nombre d'industries, avec des bon'heurs divers[33], par exemple en complexifiant l'alimentation par des convertisseurs de tension multi-niveaux. Ce faisant les contraintes sur les isolants deviennent de plus en plus prégnantes. On pourra alors s'attendre à l'augmentation des phénomènes liés à la haute tension : vieillissement des diélectriques et claquage … avec des effets couronnes dans l'air environnant les zones à haute tension…et réduction de la durée de vie des machines (soumises à des contraintes,…les

[28] Mise en série principalement pour obtenir la tenue en tension globale

[29] Mise en parallèle principalement pour supporter le courant global : cas surtout du domaine faible tension/fort courant présent dans le secteur de l'embarqué qui utilise des éléments de stockage électro-chimique (couples oxydo/réducteur chimiques caractérisé par une tension de l'ordre du Volt) [118]

[30] Par exemple, on augmente l'adhérence en rendant actif tous les points de contacts roue-sol (cas du train, du véhicule à quatre roues motrices)

[31] Par exemple dans le cas de navire à propulsion électrique pour le transport du Gaz Naturel Liquifié comportant des hélices alimentées par deux moteurs électriques « standards » couplés mécanique à l'hélice

32 La limitation physique associée est celle de l'effet de peau. On ne peut augmenter la section des conducteurs pour faire passer plus de courant…sauf si la supraconductivité à température ambiante est découverte.

33 Mal'heur par exemple de la société ABB avec le concept Windformer (éolienne à entrainement direct haute tension)

tensions, … plus élevées). Bien sûr, dans la mesure où le recyclage des matières premières (en quantité elles, limitées) pourra être assuré moyennant des consommations d'énergie importantes mais « gratuites », une faible durée de vie aura simplement pour incidence d'assurer un taux de croissance[34] intéressant, générateur d'emploi. De même, le prix du Silicium (du sable un peu modifié et beaucoup d'énergie) ne sera guère lié qu'au monopole de la connaissance qui lui est associée. Il est probable alors que la tolérance aux pannes pour ces machines de fortes puissances sera requise afin d'assurer sa fonctionnalité dont le remplacement aura toujours un coût lié à la perte de fonctionnalité temporelle du système. Le caractère polyphasé (à plus de trois phases) s'imposera alors (c'est déjà le cas pour la plupart des navires à propulsion électrique de première génération). Toujours associée à la notion d'augmentation du niveau de tension est celui de la compatibilité électromagnétique liée à la présence de front de tension dont l'intensité dépend de l'amplitude de la tension commutée.

Enfin, pour ces machines de forte puissance une des problématiques est celle de l'évacuation de la chaleur liée aux pertes : une machine de 200MW avec un rendement de 99% se doit d'évacuer 2 MW de chaleur…avec des problèmes d'emballement thermique en cas de dysfonctionnement du système de dissipation. Augmenter le nombre de phases permet dans ce cas de mieux répartir la chaleur produite au sein des composants d'électronique de puissance mais aussi donne la possibilité de mieux découpler thermiquement les phases entre elles tout en conservant d'excellentes caractéristiques de couple pour la machine.

Même dans l'hypothèse d'une énergie électrique « gratuite » le problème de l'accès à l'énergie continuera pourtant de concerner tout les systèmes embarqués. Si on peut certes imaginer une généralisation des installations nucléaires en marine, cela l'est moins dans le domaine de l'avionique. Il sera alors nécessaire de réaliser des systèmes peu énergivores ou tout au moins pour lesquels l'énergie massique et l'énergie volumique soient très élevées. En effet il faut permettre que la charge embarquée ne soit pas négligeable par rapport au poids et au volume d'énergie embarquée. Le pétrole est en cela exemplaire mais nécessite malheureusement du carbone. On pourrait bien sûr pour synthétiser ce pétrole utiliser en partie les stocks de charbon et de gaz, … la biomasse… et pourquoi pas la reconversion du carbone gazeux du CO_2 par catalyse. L'utilisation du vecteur énergétique qu'est l'hydrogène pourrait également, si le problème de sa très faible densité

34 Le « taux de croissance » actuel (en % du PIB) est d'autant meilleur si les produits ne sont pas durables puisque l'argent (et aussi l'énergie) dépensée pour produire à nouveau ce même bien est intégré dans cet indicateur macro-économique…idem pour la santé

énergétique volumique sous forme gazeuse est résolu par un stockage sous pression sécuritaire, être une solution.

Pour ces systèmes, l'efficacité énergétique deviendra fondamentale. Mais augmenter l'efficacité suppose une optimisation des systèmes qui deviennent de ce fait plus sensibles à toute perturbation énergétique. On peut par exemple prendre le cas d'un alternateur pour navire à propulsion électrique avec un rendement de 98% en régime normal. Si son entrainement par un groupe diesel et son fonctionnement en parallèle avec d'autres alternateurs couplés sur un même réseau provoque des oscillations pendulaires, une petite augmentation des pertes est alors à prévoir. Si on considère qu'il y a 1% de pertes supplémentaires (à peine mesurable au regard des énergies transitant) cela correspond néanmoins à une augmentation de 50% de la chaleur à évacuer…En conséquence, l'augmentation des rendements doit s'accompagner d'une augmentation de la tolérance aux pannes. Pour augmenter la tolérance aux pannes d'un système, la redondance est souvent la solution adoptée. Si cette redondance est énergétique et pas seulement informationnelle il faut prendre en compte l'impact sur la fiabilité du système du coupleur énergétique utilisé. Ainsi pour certains navires méthaniers récents a été choisie la redondance en utilisant deux machines électriques couplées mécaniquement pour alimenter une seule hélice : l'avenir permettra de comparer à la solution plus traditionnelle d'une machine polyphasée où le couplage de l'énergie se situe au niveau électromagnétique/électrique et non au niveau mécanique.

On terminera l'exploration du monde à « énergie (quasi)-gratuite » par la généralisation du concept polyphasée en celui de structure électromagnétique modulaire. Dans le cas de machine à très grand diamètre (machine à fort couple basse vitesse ou par exemple hélices RIM driven[35][CN5][CI34][CI30][CI28]) on peut facilement imaginer que le dimensionnement de la machine sera conditionné fortement par les contraintes mécaniques et que la transmission électromécanique se fasse par plots mécaniques répartis sur la structure mécanique. Il conviendra alors de ne pas exciter ou même de contrôler les modes résonants du système dont le caractère « flexible » ne pourra plus être négligé. On obtiendra alors plusieurs bobines qu'il conviendra de coupler électriquement de différentes façons : dans le domaine des petites et moyennes puissances un couplage permettant de réaliser une structure triphasée pourra être adopté [163] mais le contrôle des vibrations induites par les harmoniques devrait là encore justifier le recours à des solutions polyphasées.

[35] Machine électrique intégrée dans le carénage de l'hélice avec donc par conséquent un diamètre très grand en comparaison avec celui d'une machine électrique classique de même puissance.

En résumé, les entraînements polyphasés permettront de par leur tolérance aux pannes et la modularité apportée par le paramètre « nombre de phases » d'assurer de façon fiable la conversion électromécanique en très forte puissance ou pour les équipements embarqués.

Dans le contexte d'une pénurie d'énergie

Envisageons le scénario d'une pénurie d'énergie, scénario qui pourrait être temporaire mais bien réel pour une majorité de l'espèce humaine, en attente d'une encore très hypothétique maitrise de la fusion nucléaire[36].

Dans ce contexte, c'est bien notre rapport à l'énergie qu'il faut reconsidérer. A l'extrême, peu importera le coût de l'investissement « financier » pour récupérer l'énergie où qu'elle se trouve, seul importera le gain énergétique relatif à une extraction. Il faudra en effet que le coût énergétique total comprenant d'une part celui de la réalisation du dispositif permettant de récupérer l'énergie et d'autre part son coût de possession (maintenance et énergie de recyclage) soit inférieur à la quantité d'énergie récupérée par le dispositif tout au long de sa vie[37]. C'est dans ce contexte de rendement énergétique de vie η_v qu'il faudra comparer les différents systèmes de production :

η_v =Energie récupérée/(énergie nécessaire à la fabrication, à la maintenance et au recyclage).

La viabilité d'un procédé de récupération énergétique dépendra de la condition $\eta_v>1$.

Dans notre société basée sur le taux de croissance, il peut être plus intéressant pour dynamiser la croissance de créer des biens jetables périodiquement renouvelés. Bien entendu cette dynamique suppose que le coût énergétique à la fabrication[38] soit acceptable. L'acceptation dépend du stock d'énergie disponible, de la capacité de l'environnement à digérer les « déchets » (notamment le CO_2…et autres substances) mais aussi, dans un contexte politique, des emplois créés ou sauvegardés. Alors que des signaux s'allument pour signifier les problèmes liés au stock et à

[36] Le combustible « deutérium » étant présent en grande quantité dans …l'eau.

[37] Ce n'est pas forcément ces aspects qui permettent actuellement de justifier la production des systèmes à énergie renouvelable…D'autres éléments comme le nombre d'emploi généré, l'acquisition d'un savoir et savoir-faire, la préparation des mentalités à une mutation énergétique…peuvent entrer grandement en ligne de compte.

[38] le plastique est souvent jetable sans que sa valorisation énergétique ne compense le coût de sa production.

l'indigestion de notre « Terre Patrie[39] » le troisième point est à discuter dans le contexte du capitalisme actuel de concentration croissante des capitaux.

Si on considère réserver les énergies fossiles (les carbones sous forme gazeuse, liquide ou solide) à certaines activités collectives[40] vitales (certains transports notamment ou des réserves de secours), les énergies renouvelables qui proviennent toutes de l'énergie solaire (éolien, solaire thermique, solaire photovoltaique, hydroélectrique de par le phénomène d'évaporation, biomasse) deviendront les sources de base. Ce schéma doit être enrichi de l'apport, selon les pays, de l'énergie géothermique (énergie de la terre), de l'hydrolien (énergie de la lune) et/ou de l'énergie nucléaire[41] (énergie de l'atome).

Ce décor étant planté, en considérant que l'être humain ne veuille pas se priver des moyens de communication[42] l'énergie électrique restera incontournable pour l'alimentation des réseaux de communication informationnels. Les machines électriques interviendront également dans de nombreux procédés d'extraction de l'énergie : éolien, hydrolien, macro-hydraulique mais aussi micro-hydraulique. Ces énergies étant par nature fluctuantes devront être associées à des énergies de « réserve » (fossiles, barrage, hydrogène, gaz, réservoir souterrain[43]).

Néanmoins, les éléments énergétiques quantitatifs[44] mettent en évidence que le flux énergétique annuel récupérable par personne dans le cadre des énergies renouvelables sera concrètement bien plus faible que celui actuellement utilisé par personne dans les sociétés occidentales. Il est donc nécessaire toute chose égale par ailleurs d'améliorer de façon drastique le rendement de vie des biens utilisés. Cela signifie donc tendre vers la durée de vie la plus longue possible des produits[45],

---

[39] Morin : même si les distances géographiques et les barrières sécuritaires permettent d'isoler les peuples, l'atmosphère de la terre est mutualisée. C'est une mondialisation inaliénable alors que celle actuelle surtout liée aux transports et même celle plus pérenne liée à l'information (web) sont plus incertaines.

[40] On peut aussi imaginer, de part la disparité de la localisation des énergies fossiles, une confiscation de ces énergies par des états et/ ou des états/consortiums puissamment armés ;

[41] Il est à noter qu'un point délicat de l'énergie nucléaire est que le site de production est jusqu'à présent éloigné des centres de consommation. De ce fait le rendement global (à peu près 30%) ne peut être augmenté du fait de l'impossibilité d'une cogénération. De plus cet éloignement implique une vulnérabilité de ce mode d'approvisionnement liée à celle du réseau de transport heureusement maillé mais s'effectuant par lignes aériennes. On peut imaginer dans une génération IV de centrales nucléaires au cœur des centres de consommation améliorer le rendement global et la sureté en approvisionnement aux prix d'un risque plus élevé.

[42] ce seront peut être les seuls échanges faible cout que pourront se permettre la majorité des êtres humains, les transports physiques devenant prohibitifs soient en termes de temps (la voile… !), soit en terme de coût énergétique.

[43] On peut ainsi imaginer utiliser les carrières souterraines présentes sous de nombreuses villes pour y établir des réservoirs d'eau permettant de recevoir l'eau stockée en surface (récupération des eaux pluviales par exemple) et ainsi fournir de l'énergie électrique.

[44] Conférences sur l'énergie de Jancovici à l'école des Mines de Paris;
http://www.manicore.com/documentation/articles/conferences.html

[45] Il suffira d'adapter la maitrise de durée de vie acquise au niveau des produits à des fins défavorable à une croissance du PIB obtenue par le processus de remplacement des produits.

réduire le coût énergétique lié aux transports et à la production des biens manufacturés. La conception devra prendre en compte le coût énergétique de production, celui de la réparation et celui du recyclage. Ce concept de cycle est largement développé dans la notion d'éco-conception mais pas toujours avec l'approche énergétique. L'achat d'un produit par un consommateur pourra être lié à un label énergétique vital[46] .

Dans ce cadre, les machines se doivent de retrouver la **simplicité de réalisation** de leurs origines (19ieme siècle) mais en y intégrant l'efficacité énergétique la plus élevée possible pour une durée d'utilisation élevée. La simplicité doit s'entendre dans la capacité des machines à être réparées et recyclées. Par exemple il faudra considérer la modularité des pôles d'une machine électrique que ce soit au niveau des aimants ou des bobinages. Pour autant il faudra que les caractéristiques de la conversion électromécanique soient acceptables. Cela signifie que les fluctuations de puissances devront être tolérées par la charge : ainsi pour les systèmes fonctionnant à basse vitesse le couple ne devra pas être trop pulsatoire. L'augmentation du nombre de phases est aux machines électriques ce qu'est l'augmentation du nombre de cylindres d'un moteur thermique : tout en restant avec une commande simple il est possible d'obtenir des couples pulsatoires faibles. La machine triphasée quant à elle requiert une commande plus complexe (commande vectorielle sinus) ainsi qu'une conception des bobinages et du rotor plus complexes (nécessité d'obtenir une fmm et une fem sinusoidale). C'est à notre sens cette rusticité, inhérente d'une **machine qui tolère les harmoniques d'espace**, qui permet de trouver des configurations de bobinages assez simples à réaliser et donc également à réparer.

Dans le cadre des entraînements électriques, les machines polyphasées ainsi que les machines à courant continu, souvent polyphasées au rotor, répondent globalement à ces types de critères. Comparons les deux technologies avec ou sans balais :

- la famille des machines polyphasées sans balais permettra en général de garantir un MTBF[47] plus grand et une durée d'immobilisation plus faible dans la mesure où un point critique est la durée de vie des balais. La complexité (nombre d'heures de travail) en termes d'accessibilité des balais et la durée de l'immobilisation importante sera à comparer

46 Ce label vital pourrait prendre en compte le coût estimé au niveau global mais aussi le coût de possession avec des éléments sur la facilité concernant la réparation, les taux de pannes, etc

[47] Voir note 26

principalement avec le surcout énergétique de l'onduleur de tension (commutateur électronique) de la machine polyphasée à courant alternatif ;

- Lorsque les densités de courant augmentent et/ou les vitesses de rotation, les machines polyphasées s'imposeront également ;

Nous avons volontairement repris l'exemple de la machine à courant continu qui paraissait comme un choix technologique suranné il y a quelques années. Il n'est pas évident que l'avantage soit toujours du côté des machines à courants alternatifs lorsqu'on considère les aspects coûts de possession. La réparation qui consiste à changer les balais requiert certes de la main d'œuvre, par contre, le coût de la pièce est dérisoire par rapport à un bras d'onduleur de tension. Il faut prendre en compte l'impact de la durée de la réparation : par exemple dans une chaîne où 100 personnes travaillent, un arrêt d'une heure a un impact considérable alors que le remplacement au sein d'un système multi-machines (train par exemple) peut avoir peu de conséquences puisque le système est capable de fonctionner en mode dégradé jusqu'à une prochaine maintenance programmée. De même, si on considère un véhicule hybride automobile les contraintes sont tout à fait différentes relativement à la fiabilité du système électrique selon que l'on considère une hybridation série, parallèle ou mixte. Ou encore, dans le cadre d'une direction assistée sans fil, la tolérance aux pannes de la machine à retour d'effort est fortement souhaitée.

Enfin un autre élément favorable concernant les machines polyphasées est relatif à la valeur **de la tension de travail** du bus continu. En effet, l'augmentation du nombre de phases implique un niveau de tension en général plus faible (pour un même nombre d'encoches et une même section de fil). De ce fait, les machines polyphasées sont bien adaptées aux applications embarquées utilisant des éléments de stockage chimique. En effet, l'augmentation de la tension par association de modules élémentaires faible tension (quelques Volts du fait de la valeur du potentiel d'oxydo-réduction) comporte intrinsèquement un facteur de risque (tout comme la mise en série de semi-conducteurs). En cas de défaillance d'un élément, la détection par des dispositifs simples est malaisée. La conséquence d'une défaillance élémentaire est alors une sollicitation accrue des autres éléments au prix d'un vieillissement accéléré. Ainsi l'utilisation, bien que technologiquement possible, des niveaux de tension continu rencontrés dans les entrainements du réseau triphasé standard (de l'ordre de 500/600V) nécessite déjà la mise en série de très nombreux composants élémentaires. Par ailleurs, l'ondulation plus faible du couple implique naturellement également une

ondulation faible du courant de bus : les composantes alternatives sollicitant alors moins les composants chimiques (de type capacité).

Si le nombre de travaux concernant les machines polyphasées alimentées par onduleur de tension s'est considérablement accru depuis les années 2000 du fait de l'arrivée à maturité de briques technologiques nécessaires (notamment la partie informatique industrielle), l'opportunité industrielle était moins évidente sauf à considérer des effets de niche. Par ailleurs 40 années de développements importants des convertisseurs d'électronique de puissance pour alimenter les machines triphasées existantes ont eu pour effet d'accroitre la compétence dans ce domaine aux dépends de celui de la conception de machine (dont l'enseignement a été délaissé au profit de celui de l'électronique de puissance et de la partie commande). Les points durs concernant ces domaines sont à présent levés pour les machines triphasées classiques en termes d'alimentation et de commande. Un développement plus fort vers de nouvelles machines bénéficiant d'une part des avancées technologies concernant les diélectriques et les matériaux magnétiques mais aussi d'autre part de moyens numériques de conception plus puissants est possible. A cela il faut ajouter, les nouvelles contraintes en termes de développement durable sur la prise en compte énergétique du cycle de vie (durée de vie, coût de possession,…) qui dépendront essentiellement des réglementations communautaires que sauront prendre ou non les instances politiques.

C'est dans ce contexte que les entraînements polyphasés pourront se développer dans les créneaux où les machines triphasées se justifient actuellement.

Pourquoi les machines polyphasées pourraient-elles ne pas se développer ? A notre sens les possibilités sont avant tout du domaine du sociétal plutôt que d'ordre technique.

Prenons les exemples des publications dans le monde académique de la recherche. Comme il a été vu dans l'état de l'art, le nombre de spécialistes (publiants) dans le domaine est assez réduit au niveau mondial. Par ailleurs on distinguera pour chacun une spécialisation plus ou moins marquée pour chaque domaine du polyphasé (commande de l'électronique de puissance ou conception machine ou contrôle de type commande vectorielle). Si de ce fait les problématiques générales peuvent être aisément présentées la compréhension des phénomènes propres aux entraînements polyphasés est moins immédiate. En effet, les entrainements polyphasés sont de par leur caractère Multi-machines Multi-convertisseurs et donc d'une certaine manière multi-disciplinaires. Nous employons le terme multi-disciplinaire alors que les compétences considérées ne sortent pas du

domaine du Génie Electrique (on pourrait prendre en compte les aspects de mécanique vibratoire et de thermique). La multi disciplinarité s'entend au sens des divisions pointues qui s'opèrent dans le domaine de la recherche académique (soit de la conception, soit de la commande soit de l'électronique de puissance) menant à proposer les articles dans une de ces trois « petites » disciplines. Il n'est pas toujours évident de convaincre un reviewer très spécialisé en commande des problématiques de bobinage à pas fractionnaire sur la détermination des constantes de temps pour la problématique d'une commande MLI…ou de même convaincre un reviewer spécialisé en conception de machine des problématiques que la commande peuvent avoir sur la conception d'une machine. Chaque reviewer ne se sent pas concerné par une partie de l'article et considère sa partie comme moyennement innovante. C'est donc plutôt dans des revues soient à caractère théorique (présentation des concepts globaux) soient à caractère « systèmes » que se situent ce type de recherche. Bien sûr, il est possible de morceler et de distiller la connaissance mais au risque de ne pas faire ressortir les points durs à résoudre allant presque à l'encontre de l'objectif de base de la publication scientifique au sens de la diffusion de connaissance. On rejoint alors au niveau de la recherche l'équivalent de la production du produit de consommation éphémère[48] mais permettant de réaliser la fonction pour laquelle il est créé pendant une durée suffisante aux évaluations académiques (cycle de vie de deux à quatre ans au sens des impacts facteurs des revues ou des différents critères d'évaluation de type h_index).

De même dans le cadre de structuration de laboratoire, le positionnement d'une recherche pluri-disciplinaire s'accorde mal avec un positionnement simple dans une seule équipe. Bien sûr, il est possible d'imaginer des projets pluridisciplinaires mais plus difficilement une recherche pluridisciplinaire. Un cantonnement dans une des sous-disciplines (commande, conception, électronique de puissance) a pour effet de s'interdire une résolution globale du problème mais permet par contre une meilleure efficacité en termes de publication.

Nous avons pris l'exemple du morcellement de la connaissance au niveau du secteur de la recherche. Au niveau du domaine industriel par nature plus pluridisciplinaire, l'obstacle majeur à notre sens est que l'extension des acquis des machines triphasées n'est pas évident. Ainsi si on cherche lors de la réalisation d'une machine polyphasée à produire une force magnétomotrice bien sinusoidale en utilisant des techniques de bobinages qu'il est aisé d'étendre au cas polyphasé alors on risque d'avoir une mauvaise machine polyphasée car très sensible aux harmoniques de tension. Les résultats peu probants et inattendus risquent d'oblitérer tout développement ultérieur. Ceci

[48] non destiné à durer mais requérant une quantité d'énergie non nulle

étant, des signes encourageants existent puisque se développent dans d'autres domaines que ceux classiques de la marine des exemples d'entrainements polyphasés alors même que les aspects fiabilité ne sont pas recherchés (moteur à sept phases vélo à assistance au pédalage électrique MATRA Transport, petite éolienne à cinq phases KESTREL, alterno-démarreur à 7 phases VALEO, …).

En résumé, le point faible des entrainements polyphasés est qu'ils nécessitent, plus que les entrainements triphasés, une réelle approche de type « Drive » : une conception globale doit être réalisée et non un assemblage d'une machine, d'un onduleur et d'un algorithme de commande.

Ces considérations générales étant faites on propose des développements scientifiques pouvant être opérés dans les entraînements polyphasés en mettant l'accent soit sur la machine soit sur le contrôle rapproché par l'électronique de puissance soit sur la partie plus globale contrôle/commande.

32. Machines électriques

- **Eco-conception et bobinage à pas fractionnaire :** si on considère le nombre de phases comme un paramètre de conception, il est possible de définir un nombre bien plus important de solutions que dans le seul cas triphasé. Les inconvénients connus de ce type de bobinage en triphasé sont la présence de champs rampants (lié s aux harmoniques d'espace). Par nature, ces champs varient plus lentement que le champ du premier harmonique. De ce fait, il est possible de supposer compenser par la commande les inconvénients occasionnés par des sous-harmoniques par injection de courants adéquats. Les bobinages à pas fractionnaires permettent d'améliorer les caractéristiques de la machine en termes énergétiques (meilleur coefficient de remplissage, tête de bobines plus courte, .. etc). Si des développements ont déjà été réalisés dans le cadre des thèses de Franck Scuiller et d'Antoine Bruyère il est nécessaire d'étudier encore l'impact de ces bobinages dans le cas de court-circuit mais aussi en termes de vibrations induites (Thèse en collaboration avec l'IRENav). Enfin, nous avons associé le terme éco-conception à celui de bobinages à pas fractionnaires. En effet de par leur simplicité ces bobinages nous semblent propices à des réalisations simples et de ce fait plus facilement réparables que les bobinages classiques où l'imbrication (têtes de bobines) rend difficile la réparation partielle de la machine.

• **Etudes des pertes, « effet des harmoniques »** : on a vu qu'une des particularités des entrainements polyphasés était que les harmoniques n'étaient pas forcément indésirables et qu'ils permettaient même d'augmenter le couple massique. Néanmoins le calcul des pertes (dans les tôles et/ ou dans les aimants) qui pourraient être dues à la présence d'harmoniques n'a pas été réalisé. La non-linéarité forte des phénomènes ainsi que la difficulté de réaliser ce type de calcul par éléments finis suppose dans la pratique des dispositifs expérimentaux pour tester ce type de problématique que D. Howe [49] a initié par un article relatif aux pertes dans les aimants. Il est à noter également que dans les commandes en mode dégradé les optimisations de commande sont faites en considérant uniquement les pertes Joule statoriques. A ce niveau, c'est plutôt une optimisation globale qu'il faudrait considérer. Dans la mesure où l'on dispose déjà de trois prototypes avec des échantillons de matériaux magnétiques, des études pourraient être initiées en ce sens dans le cadre de collaborations avec l'équipe Modélisation relativement à la thématique Matériaux Magnétiques.

• **Maitrise des harmoniques (aimants/bobinages/structures)** : il a été vu qu'un contrôle aisé requérait la présence d'un seul harmonique par machine fictive. L'action des aimants et le choix du bobinage pour les machines à aimants déposés en surface ont été étudiés dans les thèses de Franck Scuiller et de Fabrice Locment mais n'ont pas toutes faites l'objet de réalisations expérimentales. On pourra penser au développement réalisé dans la thèse de Fabrice Locment concernant l'utilisation de plusieurs aimants de natures différentes pour moduler le champ magnétique dans l'entrefer. Par ailleurs, il reste à explorer la modulation des harmoniques en utilisant des machines synchrones à aimants enterrés ou des machines à réluctance variable polarisées.

• **Myriades de petites machines « couplées »** : dans le domaine des petites machines, une fonctionnalité mécanique globale[49] pourrait être réalisée en utilisant de nombreux actionneurs couplés magnétiquement entre eux du fait de phénomène de proximité ; on pourrait également s'intéresser à des commandes multi-actionneurs (par exemple pour les injections électroniques) partageant une partie

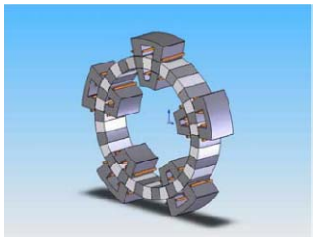


Figure 36: exemple demachine à plot pentaphasée [50]

[49] par exemple l'orientation de petits miroirs dans le cas d'un télescope spatial multi-miroirs…afin de réaliser une surface équivalente importante

de l'énergie magnétique afin de réduire le dimensionnement des composants de type capacité d'entrée par effet de foisonnement.

• **Des machines à couplage fort électromagnétique/mécanique :** dans le cadre de machines dont les diamètres sont imposés non pas par les caractéristiques électromagnétiques classiques mais par des considérations mécaniques[50] alors il peut être intéressant de penser à des machines à plots[51]…mais la commande des plots étant coordonnée comme dans le cas d'une machine polyphasée. Dans ce type de machines les déformations de la structure mécanique sous l'effet des forces mèneront, si l'on cherche à alléger au maximum la structure, à prendre en compte les déformations mécaniques dues aux forces électromagnétiques. Il devrait être possible de compenser ces déformations par action sur la commande.

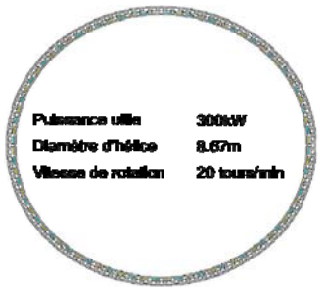


Figure 37: exemple d'hydrolienne RIM 300kW (thèse L. Drouen)

• **Des machines basse tension forte puissance :** les systèmes embarqués font souvent appel à des éléments de stockage chimique dont les niveaux élémentaires de tension sont de l'ordre du Volt. L'augmentation de l'utilisation de l'énergie électrique dans ce type de systèmes et le souci d'une optimisation énergétique mène à une recherche d'augmentation globale du rendement. Or les pertes Joule sont fortement liées à la longueur des câbles de transport (automobile, train, avion, etc). Au niveau des actionneurs électriques, l'augmentation de tension n'est pas fondamentale pour une amélioration du rendement. Par contre, les chutes de tension « parasites » telles que celles au niveau des connexions, des interrupteurs ou des éléments de stockage sont moins perceptibles lorsque la tension augmente : les pertes relatives associées diminuent alors. Par contre, l'augmentation du niveau de tension s'accompagne d'une part d'une augmentation du risque électrique (isolation) et de compatibilité électromagnétique et nécessite d'autre part un nouveau design de l'ensemble des convertisseurs électromécanique de l'automobile. Si l'augmentation jusqu'au niveau industriel (entre 500 et 600V pour le bus continu) permettait l'utilisation de composants standards (transistors, capacité, moteurs), les contraintes se reporteraient sur la gestion sécuritaire et économique de la mise en série de centaines d'éléments

[50] exemple des hydroliennes de type RIM dont le diamètre est en fait celui de l'hélice ou encore une éolienne de 10 MW. On a alors des structures de type annulaires.
[51] Au lieu d'avoir un stator continu, on a seulement quelques morceaux de taille suffisante pour assurer la conversion d'énergie

de stockage électrochimique. A cet aspect, il faut ajouter celui d'une meilleure tenue aux températures élevées (cas de l'automobile ou de l'avionique) d'interrupteurs basse tension [1], point favorable à l'utilisation de faibles tensions…et donc à forts courants (à puissance donnée). Le nombre de phases sera alors un paramètre d'adaptation par rapport à une optimisation globale tant du point de vue rendement énergétique que des coûts. Enfin l'émergence de composants SiC permettant un travail à température bien supérieure à 125°C avec des chutes de tension encore plus faibles mais également avec de très fort gradients de tension (temps de commutation faible) fait penser à des limitations des niveaux de tension (liés aux phénomènes de CEM).

33. Les convertisseurs d'électronique de puissance

Si on s'intéresse aux points à développer concernant l'électronique de puissance (ou plus exactement sa commande rapprochée) il existe plusieurs pistes toutes liées aux spécificités des entrainements polyphasés.

- **Maitrise de la saturation de l'onduleur de tension :**

Dans le cadre de ma thèse[52] et de celle de Xavier Kestelyn, la problématique de la saturation des consignes issues des correcteurs de courant s'est posée notamment lors des mises en œuvre expérimentales. Si l'approche vectorielle permet aisément de réaliser des algorithmes testant si les consignes impliquent une saturation ou non de l'onduleur, il était moins aisé de les implanter en temps réel sur les moyens à notre disposition. L'accroissement des moyens de calculs (avec utilisation de FPGA) devrait permettre une implantation de ce type de gestion particulièrement intéressant lorsque les niveaux de tension sont faibles (systèmes embarqués). Jusqu'à présent, lorsque cet aspect de saturation était abordé il se cantonnait à la saturation dans un des espaces propres. Cette approche pouvait pratiquement se justifier tant que les consignes dans les autres espaces étaient nulles. Se posant la problématique de la saturation lorsque tous les onduleurs fictifs sont sollicités, des articles récents [42] **[30]** ont remis en évidence une problématique que nous avions abordée dans [R9] en injectant volontairement des courants élevés d'harmonique de rang 3 dans une machine pentaphasée ou dans [CI12] pour la prise en compte de l'utilisation optimale de la tension de bus dans le cas d'une machine heptaphasée : la problématique du couplage des différents polygones représentatifs de l'onduleur dans les différents plans caractéristiques de la machine.

[52] Notamment le chapitre IV concernant la commande d'un onduleur de courant en MLI.

Des travaux devraient être réalisés pour la prise en compte directement dans l'espace de dimension *n* des limitations de l'onduleur lorsque les consignes de ce dernier sont délivrées par des correcteurs de courants : il est alors nécessaire de gérer les saturations de ces correcteurs non pas, voie par voie, mais de façon globale (comme c'est déjà le cas pour la représentation d'un onduleur triphasé par un hexagone aux frontières bien définies). Cette capacité doit permettre l'optimisation de l'utilisation des bus de tension continu. C'est une approche mixte, tenant compte, et de la commande rapprochée d'onduleur multibras, et de la synthèse de correcteurs non plus scalaires mais vectoriels[53] avec des dispositifs anti-saturation vectoriels, qui doit être menée.

- **Minimisation des commutations et des modes communs**

Un onduleur de tension est fondamentalement un système échantillonné ne pouvant imposer qu'un nombre réduit de vecteurs tension. Ce nombre augmente avec le nombre de bras mais aussi avec le nombre de niveaux de l'onduleur de tension. Le recours à des onduleurs de tension multiniveaux lorsque les niveaux de tension augmentent (cas des fortes puissances) permet de réduire les problèmes de compatibilité et facilite l'usage de composants de tension nominale assez faible et standard. Néanmoins, le comportement de ces structures en régime dégradé est délicat étant donné le nombre de configurations possibles. Le couplage entre des structures multibras et multiniveaux devrait permettre d'étendre les solutions [120]. Le maillage obtenu de l'espace par ces structures multi-niveaux multibras autorise de passer d'un point à un autre de l'espace des tensions en passant par un chemin maillé permettant de réduire les commutations mais aussi l'amplitude des niveaux de tension de mode commun. Une étude avait été initiée dans cet esprit avec le GREEN [127] afin de solutionner, dans le cadre d'une alimentation à haut niveau de fiabilité (5 phases alimentées par une structure à 10 bras), un problème de courant parasite: un choix de famille de vecteurs activés permet de ne pas exciter des tensions homopolaires à l'origine d'une grande partie des courants parasites observés.

- **Commande instantanée et reconfiguration en cas de défaut d'onduleur**

[53] Cette problématique était déjà celle rencontrée dans ma thèse puisque l'ensemble machine asynchrone/condensateur, par nature système instable au sens des résonances, devait être contrôlé à tout moment et ne supportait pas de ce fait des phénomènes de saturation non contrôlés comme c'est le cas souvent pour les commandes classiques non optimisées avec onduleur de tension.

La méthode classique de commande des onduleurs repose sur une commande aux valeurs moyennes. Si les sommets de l'hypercube permettent de caractériser les vecteurs discrets qu'il est possible d'atteindre, c'est le volume de l'hypercube qui caractérise le domaine accessible par une commande aux valeurs moyennes. Réaliser une commande aux valeurs moyennes revient à rechercher les coordonnées barycentriques d'un point au sein d'un volume comportant des sommets choisis en fonction de stratégies de commande. Si cette approche est simple, cette simplicité se paie par la nécessité d'une période de Modulation de Largeur d'Impulsion assez petite devant la constante de temps électrique. En fait dans le cas d'une machine polyphasée il faut que la période de MLI soit faible devant la plus petite des constantes de temps électriques. Si une des constantes de temps des machines fictives est très faible, cela implique une contrainte très forte. C'est la raison pour laquelle on peut penser à rajouter des filtres qui n'agissent que sur certains harmoniques [103] ou encore penser la machine pour que les constantes de temps soient du même ordre. En fait, il y a également une autre piste à explorer, celle d'une commande que nous qualifions d'instantanée. Au lieu de travailler avec le concept de valeur moyenne, l'idée est de travailler directement avec les sommets de l'hypercube. Lorsque le maillage de l'espace est suffisamment dense ce type d'approche devient envisageable : l'idée est, pour un vecteur de tension de référence donné à un instant t, de trouver le vecteur tension le plus proche nécessitant le minimum de commutations par rapport au vecteur tension actif au même instant. Bien entendu, ce type de commande peut également être envisagé dans le cadre d'une machine triphasée alimentée par des onduleurs de tension multi-niveaux. Néanmoins, les machines polyphasées montrent une spécificité par rapport à ce type de problématique lorsque les constantes de temps sont différentes. On pourrait ainsi privilégier les vecteurs instantanés permettant de réduire à un niveau acceptable les courants parasites liés à l'existence d'une petite constante de temps tout en sachant que pour les autres machines comportant de plus grandes constantes de temps les courants parasites associés seraient automatiquement acceptables. Bien entendu, ce type d'approche nécessite des moyens de calculs importants au niveau de la commande rapprochée de l'onduleur. Mais le développement des FPGA devrait permettre d'atteindre dans le futur ce type de contrainte. En généralisant cette notion, on peut même imaginer que des choix adéquats de vecteurs pourraient faire apparaître des fréquences de commutation différentes selon les espaces propres de la machine : avec une même période de MLI physique apparaîtraient des périodes de MLI différentes selon les machines : le cas extrême est celui où le vecteur tension imposé dans une machine fictive est constamment nul.

Une modélisation discrète par hypercube pourra permettre de définir rapidement les chemins interdits lors d'un fonctionnement en mode dégradé. Ce type d'approche a déjà été initié dans le cadre d'une commande aux valeurs moyennes en recalculant le volume réduit accessible en cas de perte d'un bras d'onduleur [167]

34. L'entrainement électrique polyphasé

- **Reconfiguration de commande en cas de défaut : phase ouverte, court-circuit ;**

La robustesse inhérente des entrainements polyphasés à des défauts de type ouverture de phase ne doit pas faire oublier que ce type de défaut s'accompagne, si aucune mesure n'est prise sur la commande, de l'apparition de couples pulsatoires. Même si ces couples peuvent ne pas avoir d'impact sur la vitesse lorsque les fréquences de pulsation sont filtrées par la mécanique du système il n'en reste pas moins que des sollicitations mécaniques de l'arbre peuvent être contraignantes, menant à un vieillissement accéléré. Il faut donc s'intéresser à la quantification de ces couples, soit pour les atténuer par une commande adéquate, soit pour dimensionner correctement les pièces en termes de résistance mécanique. Si la faisabilité d'une adaptation de commande en temps réel a été mise en évidence notamment dans la thèse de Fabrice Locment et est poursuivie dans la thèse d'Yvan Crévits,il n'en reste pas moins qu'il y a encore à réaliser des études sur les aspects de détection automatique des défauts, soit en ajoutant des dispositifs physiques supplémentaires, soit par analyse de signaux pertinents (Collaboration de thèse de Fabien Meinguet à l'Université Libre de Bruxelles). Par ailleurs il est également nécessaire de s'intéresser à l'impact de court circuit inter-spire soit pour imaginer mettre à profit les couplages magnétiques entre phases pour réduire ces courants [46] soit pour calculer la vitesse limite admissible [CI29].

- **Comparaison de structures avec ou sans couplage magnétique :**

Dans le cadre des machines polyphasées, on trouve schématiquement deux familles de machines : avec ou sans couplage magnétique entre phases. Lorsque les phases sont éloignées les unes des autres afin de garantir qu'un problème sur une phase n'implique pas une propagation de défaut sur les autres phases, il n'y a plus en général de couplage magnétique entre phase…couplage fort utile lors de la commutation d'une phase à l'autre pour limiter les

surtensions[54]. Une comparaison de ces deux familles de machines pourrait être intéressante pour différents défauts. Un meilleur comportement en cas de court-circuit n'implique t il pas une sensibilité accrue lors de l'ouverture d'une phase ?

- **Utilisation des particularités des machines polyphasées pour la commande sans capteur**

  Un dernier point est l'utilisation des particularités des machines polyphasées pour la mise en œuvre de commande sans capteur. En effet, nombre de commandes sans capteurs pour les machines triphasées utilisent l'harmonique de rang trois (liée, avec notre approche, à la machine homopolaire). Dans le cas des machines polyphasées, il existe plusieurs machines fictives. On pourrait imaginer utiliser l'une d'elle pour réaliser un estimateur de position en mettant à profit les propriétés harmoniques. Un sujet de Master est en cours sur l'année 2008/2009 sur cette problématique. La robustesse pourrait ainsi s'étendre au capteur de position dont la défaillance pourrait être remplacée par une estimation de la position…avec certes une précision moins grande et donc des performances moins élevées.

Développement d'un axe « entrainements destinés au développement durable »

Même si la présentation des travaux réalisés depuis 2000 a été effectuée avec le fil directeur des entrainements polyphasés, il est possible de trouver un autre fil directeur qui m'a guidé et motivé également dans mes orientations : celui d'une contribution au développement d'une technologie à faible empreinte écologique ou tout au moins à la réduction de l'empreinte de systèmes : thèse sur une machine à flux axial à sept phases dans le cadre du projet FUTURELEC2 concernant des éoliennes de Jeumont AREVA basées elle-aussi sur une technologie à flux axial mais dont la fiabilité (et la puissance) n'étaient pas suffisantes pour une exploitation off-shore ; alterno-démarreur à 7 phases développé par VALEO pour conférer la micro-hybridation à des grosses cylindrées ; co-encadrement d'une thèse sur la conception d'une hydrolienne avec l'IRENav.

En ce sens, la tolérance aux pannes est un point fort de ces machines polyphasées qui se doivent, nombre de phases oblige, d'être associées à des convertisseurs d'électronique de puissance. Le sens de l'histoire est de minimiser le plus possible les composants (réduire le surdimensionnement) permettant au flux énergétique de transiter tout en conservant une fonctionnalité (peut-être un peu

[54] Bien entendu lorsqu'il y a alimentation par onduleur de tension avec des effets de diode de roue libre, ces surtensions n'apparaissent qu'en cas de défaut de ces diodes.

dégradée) la plus grande possible. Tout comme pour les avions, la fiabilité sera le plus possible garantie par des commandes redondantes (les coûts en énergie de fabrication d'une puce étant intrinsèquement plus faible que ceux d'un composant de puissance ou encore plus d'une machine surdimensionnée).

Alléger les structures, augmenter le rendement des machines électriques sera fort probablement une problématique majeure dans le futur. Faut-il attendre que l'on s'aperçoive que ces améliorations énergétiques se feront, si l'on conserve les mêmes structures, au prix d'une diminution de la fiabilité globale pour penser ensuite à des structures intrinsèquement plus fiables ? L'histoire dicterait probablement une réponse positive…mais faut-il répéter l'histoire ?

A notre sens, il y a tout de même une différence fondamentale avec la science d'hier : c'est la manière de stocker la connaissance. La mémoire numérique de travaux indexés par mots clés dans des banques de données permet de rendre à « jamais » durable les connaissances. Si celles-ci ne sont pas fortement liées à la technologie du moment il sera possible alors de les reprendre et de s'appuyer au moment opportun sur les développements théoriques réalisés des années auparavant. Bien entendu, cette connaissance sera accessible à tous, sauf problème de barrière de langues ou mesure protectionniste (stratégiquement) d'accès aux données.

Bien entendu, notre point de vue est que la technologie est suffisamment mûre aujourd'hui, si la demande existe, pour une mutation vers des systèmes à plus grande efficience énergétique qui conservent ou plutôt augmentent leur durée de vie. La notion d'éco-design commence à se répandre au sein de la société, société qui elle-seule peut, par l'intermédiaire de choix normatif (« label ») ou d'incitation financière (« taxe »), inverser un mode de vie lié à la consommation de biens (si possible peu durables et donc renouvelables à l'achat) ou l'abonnement à des services.

Ainsi, si on considère uniquement la conversion électromécanique on cherchera donc des chaines à haut rendement instantané mais également à haut rendement moyen. Si la notion de rendement instantané est bien ancrée dans la culture celle de rendement moyen l'est moins. Cette dernière tient compte du taux de disponibilité de l'équipement assurant la conversion d'énergie. En effet, c'est bien en termes de rendement moyen annuel qu'il est économiquement intéressant de considérer par exemple une éolienne ou une hydrolienne. Il est intéressant qu'elle soit capable d'extraire le plus d'énergie possible de son environnement et non seulement pour un régime de fonctionnement donné. C'est à ce niveau que le taux de disponibilité d'une machine électrique intervient également. Une éolienne de 1 MW avec rendement de 40% qu'on suppose en panne pendant trois mois en

offshore verra son rendement chuter à 30% mais surtout constituera un manque énergétique de 648 000 kWh[55] en considérant un fonctionnement possible à 1MW pendant 30% du temps. Bien entendu, le taux de disponibilité d'un équipement dépendra, d'une part de la fiabilité du dispositif mais aussi d'autre part de la maintenance. Ainsi les éoliennes off-shore sont non seulement dans un environnement plus agressif (humidité saline) mais de plus, les coûts de maintenance (accès par hélicoptère) sont a priori beaucoup plus élevés. En cas de panne, l'intervention ne pourra être immédiate. Il faut donc considérer dès la conception de l'éolienne offshore l'occurrence de la panne (robustesse du système[56]), le cout d'une redondance des fonctions[57].

Inscrivons-nous à présent dans un contexte plus large sur l'opérationnalité d'une recherche. L'acquisition d'une compétence pointue dans une branche de l'activité recherche requiert quelques années. Le développement de cette branche peut ensuite durer plusieurs années en termes de recherche pure. Une fois que l'on considère que toute la connaissance a été diffusée dans le domaine académique alors l'activité recherche s'interrompt et il reste la compétence dans un domaine, compétence qui peut être utilisée au développement de projets.

Ceci étant il est possible également de nourrir la recherche directement par le développement de projets au sein desquels l'activité principale n'entre que pour partie dans le projet. On pourra penser par exemple à la réalisation d'éolienne, d'hydrolienne, de véhicule hybride. On s'inscrit alors dans une problématique plus large et l'expertise consiste à être capable de définir les systèmes pour lesquels les entrainements polyphasés sont potentiellement bien adaptés. C'est cette approche que j'ai essayé de développer pour une application aux problèmes des énergies renouvelables se situant dans des milieux hostiles.

Il est un autre domaine favorable on l'a vu qui est celui des transports. Si on se contente de réaliser des analyses sur la dépendance énergétique en tenant compte des potentialités offertes par le traitement de l'information il est naturel de considérer que la distribution des biens et des personnes par une multitude de moyens lourds[58] individuels en privilégiant l'instantanéité (de la livraison) n'est pas une organisation pérenne. C'est dans l'investissement dans des réseaux de

55 Soit en considérant 4 c€/kWh (avec 1 baril de pétrole à 68€), la somme de 25,9 k€ ou 380 barils de pétrole (60600l de pétrole)…soit encore la consommation annuelle d'un parc de 30 automobiles de (20000km/an à 10litres/100km)…

56 C'est l'analyse du problème où une « petite » panne technique mène par effet de cascade à l'arrêt du système ;

57 Des redondances en terme de commande impliqueront par exemple un coût insignifiant par rapport à des redondances mettant en œuvre les systèmes énergétiques ;

58 (une automobile loge 4 personnes pour n'en transporter qu'une en moyenne.

transport (de l'énergie ou des biens et personnes) à faibles couts énergétiques qu'il faut se diriger. Nous rechercherons donc également l'implication dans des projets de ce type.

Conclusion sur les « Perspectives »

Un des enjeux majeurs futurs sera une meilleure gestion de l'énergie et de la matière dont la transformation est gourmande en énergie. La conversion électromécanique se devra d'être efficace non seulement en termes de rendement instantané mais également au sens du cycle de vie. L'intelligence silicium qui a connu un formidable essor se devra de contribuer à cette mutation. Les entrainements polyphasés permettent une redondance dans la transformation de l'énergie de façon plus efficace en terme énergétique qu'un ensemble multimachines[59].

Pourtant, ces entrainements souffrent de nécessiter une approche globale faisant intervenir le tryptique commande /électronique de puissance/machine avec une interaction disciplinaire bien plus grande que dans le cas des machines triphasées: la technologie est juste mure pour apporter dans ces trois disciplines les éléments nécessaires à l'émergence. Néanmoins, cette recherche nécessitant de travailler dans plusieurs domaines simultanément est-elle encore dans le champ d'un laboratoire, quel qu'il soit, dont les équipes se doivent de se spécialiser sur chacun de ces trois champs disciplinaires? Si on y ajoute les contraintes mécaniques (cas des bobinages fractionnaires ou des machines RIM driven) et thermiques (particulièrement en mode dégradé) ce n'est plus au sein d'un laboratoire mais d'un groupement de laboratoires regroupant Mécanique/Thermique/Electrique (MEDEE ?) ou d'une entreprise par nature pluri-disciplinaire que se pose la problématique des entrainements polyphasées. Le point faible de ces entrainements se situe à notre sens à ce niveau.

Revenons à des considérations plus scientifiques.

Nous avons dégagé pour le domaine du polyphasé des pistes dans les trois voies suivantes :

- **Commande rapprochée** des onduleurs mettant la puissance des FPGA au service d'une gestion des saturations et d'une commande instantanée permettant de s'affranchir du principe de commande aux valeurs moyennes
- **Conception** aussi simple que possible de machines ; c'est la prise en compte des potentialités offertes par la commande qui permet d'envisager ces structures plus simples qui doivent permettre un meilleur recyclage et réparation tout en garantissant une qualité de couple réservée jusqu'à présent aux seules machines vérifiant les hypothèses du premier harmonique d'espace et de temps.

[59] Sauf dans le cas où l'augmentation du nombre de machines permet un meilleur transfert comme c'est le cas en traction ferroviaire

- **<u>Contrôle en mode dégradé</u>** : après avoir mis en évidence les potentialités de ces machines polyphasées il est nécessaire d'approfondir afin de pouvoir gérer les passages du mode normal au mode dégradé, de développer l'étude des différents défauts (phase ouverte, court-circuit, défection du capteur de position,…).

Bibliographie

La bibliographie a été pensée dans l'optique d'un téléchargement des articles notamment grâce à la base de données IEEE explore. C'est en ce sens qu'ont été fournis les liens url quand ils étaient disponibles. Le choix de référencement s'est opéré de façon pragmatique en se basant sur la méthode en vigueur dans la base de données IEEE : c'est le nom du premier auteur qui apparaît en premier. Nous trouvons également pratique ce choix puisqu'il suffit de connaitre le nom du premier auteur (souvent le rédacteur principal) pour trouver par ordre alphabétique les articles dont il est à l'origine pendant la période de PhD.
Par ailleurs les indications V3, v5, V6, V7, Vn que nous avons ajoutés permettent de savoir en général le nombre de phases qui est considéré dans l'article en question. Cette bibliographie doit permettre rapidement de se doter des références que nous avons jugé les plus pertinentes à notre connaissance.

[1] Allard B., G. Coquery , L. Dupont , Z. Khatir , M. Lazar, S. Lefebvre, Meuret R., H. Morel, D. Planson, « Composants à semi-conducteur de puissance pour des applications à haute température de fonctionnement », J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 4, Hors-Série 1, 10 (2005)

[2] Abolhassani, M.T., "A novel multiphase fault tolerant high torque density permanent magnet motor drive for traction application," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp. 728-734, 15-18 May 2005, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531421&isnumber=32672, **V5**

[3] Abolhassani, M.T., "A Novel Multiphase Fault Tolerant Permanent Magnet Motor Drive for Fuel cell Powered Vehicles," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE* , vol., no., pp.160-167, 9-12 Sept. 2007, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4544117&isnumber=4544069, **V5**

[4] Abolhassani, M.T., "A New Concentrated Windings Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine for Wind Energy Application," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, pp. 931-936, 15-18 May 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531451&isnumber=32672 **V5**

[5] Apsley, J.; Williamson, S., "Analysis of multiphase induction machines with winding faults," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.42, no.2, pp. 465-472, March-April 2006, **Vn**
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1608224&isnumber=33779, **Vn**

[6] Apsley, J.M.; Williamson, S.; Smith, A.C.; Barnes, M., "Induction motor performance as a function of phase number," *Electric Power Applications, IEE Proceedings* - , vol.153, no.6, pp.-, November 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4015878&isnumber=4015862 **Vn**

[7] Atallah, K.; Jiabin Wang; Howe, D., "Torque ripple minimisation in modular permanent magnet brushless machines," *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International* , vol.1, no., pp. 370-375 vol.1, 1-4 June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1211290&isnumber=27264 **Vn**

[8] Atkinson, G.J.; Mecrow, B.C.; Jack, A.G.; Atkinson, D.J.; Sangha, P.; Benarous, M., "The Analysis of Losses in High-Power Fault-Tolerant Machines for Aerospace Applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.42, no.5, pp. 1162-1170, Sept.-Oct. 2006,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1703707&isnumber=35953, **V4**

[9] Aydin, M.; Ronghai Qu; Lipo, T.A., "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM motors: alternating magnet pole-arcs in facing rotors," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the* , vol.1, no., pp. 555-561 vol.1, 12-16 Oct. 2003,
URL: **http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1257555&isnumber=28116**

[10] Bekemans M., « Modélisation des machines électriques en vue du contrôle des efforts radiaux », thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Mars 2006. **V3**

[11] Bendixen, F.B.; Blaabjerg, F.; Rasmussen, P.O.; Vadstrup, P.; Krabbe, K., "Controlling the DC-link midpoint potential in a six-phase motor-drive," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.3, no., pp. 2128-2132 Vol.3, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355447&isnumber=29761,**V6**

[12] Benkhoris M. F., F. Terrien, J. E. Boucher, "Numerical Study of a Double Star Synchronous Motor Drive For Electrical Propulsion", International Conference on Electric Ship, Istanbul (Turkey), pp. 70-75, September 1998, **V6**

[13] Bennett, J.W.; Jack, A.G.; Mecrow, B.C.; Atkinson, D.J.; Sewell, C.; Mason, G., "Fault-tolerant control architecture for an electrical actuator," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.6, pp. 4371-4377 Vol.6, 20-25 June 2004.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1354773&isnumber=29758 **V3**

[14] Bennett, J.W.; Mecrow, B.C.; Jack, A.G.; Atkinson, D.J.; Sheldon, S.; Cooper, B.; Mason, G.; Sewell, C.; Cudley, D., "A prototype electrical actuator for aircraft flaps and slats," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International*

Conference on , vol., no., pp. 41-47, 15-18 May 2005,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531317&isnumber=32672 **V3**

[15] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Zigliotto, M.; Zordan, M., "Innovative remedial strategies for inverter faults in IPM synchronous motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.18, no.2, pp. 306-314, June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1201104&isnumber=27039 **V3**

[16] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Pre, M.D., "Design and Tests of a Fault-Tolerant Five-phase Permanent Magnet Motor," *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE* , vol., no., pp.1-8, 18-22 June 2006,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1712153&isnumber=36090 **V5**

[17] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Pre, M.D.; Grezzani, G., "Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.42, no.4, pp. 997-1006, July-Aug. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1658329&isnumber=34719 **V5**

[18] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Pre, M.D., "Strategies for the Fault-Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.43, no.4, pp.960-970, July-aug. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4276839&isnumber=4276837 **V5**

[19] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Pre, M.D., "Impact of Stator Winding of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor on Postfault Operations," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1978-1987, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4470593&isnumber=4505400 **V5**

[20] Blasko, V., "Analysis of a hybrid PWM based on modified space vector and triangle comparison methods," *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE* , vol.2, no., pp.947-955 vol.2, 6-10 Oct 1996,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=560197&isnumber=12219

[21] Bojoi, R.; Tenconi, A.; Profumo, F.; Griva, G.; Martinello, D., "Complete analysis and comparative study of digital modulation techniques for dual three-phase AC motor drives," *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual* , vol.2, no., pp. 851-857 vol.2, 2002,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1022560&isnumber=22002 **V6**

[22] Bojoi, R.; Lazzari, M.; Profumo, F.; Tenconi, A., "Digital field-oriented control for dual three-phase induction motor drives," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.39, no.3, pp. 752-760, May-June 2003,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1201543&isnumber=27053,**V6**

[23] Bojoi, R.; Farina, F.; Lazzari, M.; Profumo, F.; Tenconi, A., "Analysis of the asymmetrical operation of dual three-phase induction machines," *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International* , vol.1, no., pp. 429-435 vol.1, 1-4 June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1211299&isnumber=27264 **V6**

[24] Boglietti, A.; Bojoi, R.; Cavagnino, A.; Tenconi, A., "Efficiency Analysis of PWM Inverter Fed Three-Phase and Dual Three-Phase High Frequency Induction Machines for Low/Medium Power Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.2015-2023, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454442&isnumber=4505400 **V6**

[25] 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,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=873223&isnumber=18896 **V3**

[26] Botteron F., de Camargo R.F., Hey H.L., Pinheiro J.R., Grundling H.A., Pinheiro H., "New limiting algorithms for space vector modulated three-phase four-leg voltage source inverters", IEE Proc. Electric Power Applications, vol. 150, n°6, Nov. 2003, pp. 733-742.

[27] Bouscayrol A., « Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs. »**,** Décembre 2003 - Habilitation à Diriger des Recherches (USTL),
http://l2ep.univ-lille1.fr/index.php?page=8&menuparent=8

[28] Chan, C.C.; Jiang, J.Z.; Chen, G.H.; Wang, X.Y.; Chau, K.T., "A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.30, no.5, pp.1258-1266, Sep/Oct 1994
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=315237&isnumber=7605 **V5**

[29] Caricchi, F.; Crescimbini, F.; Santini, E.; Solero, L., "High-efficiency low-volume starter/alternator for automotive applications," *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE* , vol.1, no., pp.215-222 vol.1, 2000, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=881086&isnumber=19069,

[30] Casadei, D.; Dujic, D.; Levi, E.; Serra, G.; Tani, A.; Zarri, L., "General Modulation Strategy for Seven-Phase Inverters With Independent Control of Multiple Voltage Space Vectors," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1921-1932, May 2008,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454443&isnumber=4505400 **V7**

[31] Chang L. ; Muszynski, J., "Design of a 5-phase permanent magnet brushless DC motor for automobiles," *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th* , vol.5, no., pp. 3197-3201 Vol.5, 6-9 Oct. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1286228&isnumber=28572 **V5**

[32] Chapman P.L, Sudhoff S.D., Whitcomb C.A, "Multiple reference frame analysis of non-sinusoidal brushless DC drives", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 14, n° 3, Sept. 1999, pp. 440 – 446. **V3**

[33] Cros, J.; Viarouge, P., "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings ," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.17, no.2, pp.248-253, Jun 2002,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1009476&isnumber=21762

[34] Cros J., Paynot C., Figueroa J., Viarouge P., « Multi-Star PM brushless DC motor for traction applications", Proc. of EPE'03, Toulouse (France), Sept. 2003, CD-ROM.

[35] De Silva, P.S.N.; Fletcher, J.E.; Williams, B.W., "Development of space vector modulation strategies for five phase voltage source inverters," *Power Electronics, Machines and Drives, 2004. (PEMD 2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498)* , vol.2, no., pp. 650-655 Vol.2, 31 March-2 April 2004,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1350100&isnumber=29680 **V5**

[36] Delarue, P.; Bouscayrol, A.; Semail, E., "Generic control method of multileg voltage-source-converters for fast practical implementation," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.18, no.2, pp. 517-526, Mar 2003,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1189602&isnumber=26670

[37] Dhawan, R.; Soghomonian, Z., "Seven phase brush-less synchronous motor with reduced inverter size," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE* , vol.2, no., pp. 1099-1105 vol.2, 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1295959&isnumber=28819 **V7**

[38] Dorrell, D.G.; Leong, C.Y.; McMahon, R.A., "Analysis and performance assessment of 6-pulse inverter-fed 3-phase and 6-phase induction machines," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* , vol.1, no., pp. 492-499 Vol. 1, 2-6 Oct. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1518353&isnumber=32505 **V6**

[39] Du C.; Xiaofeng Zhang; Xiaodong Gao, "DSP Based Direct Torque Control of 12-phase Synchronous Propulsion Motor Drives," *Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on* , vol., no., pp.1-5, 24-26 May 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4026007&isnumber=4025694 Vn

[40] Du C., Xiaofeng Zhang; Hua Lin; Xiaodong Gao, "Improvement of low-speed operation performance of DTC for three-level inverter-fed multi-phase synchronous motor," *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on* , vol.1, no., pp. 132-137 Vol. 1, 27-29 Sept. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1574733&isnumber=33302 **V5**

[41] Dubus J. M., A. De Vries, D. Even and J. C. Mipo: "Polyphase stator of a rotating electrical machine with claw-pole rotor and alternator or alternator starter comprising same", French Patent WO 2007/031679 A2, March 2007.

[42] 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, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454354&isnumber=4505400 **V5**

[43] Dujic, D.; Levi, E.; Jones, M.; Grandi, G.; Serra, G.; Tani, A., "Continuous PWM Techniques for Sinusoidal Voltage Generation with Seven-Phase Voltage Source Inverters," *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE* , vol., no., pp.47-52, 17-21 June 2007,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4341959&isnumber=4341940 **V7**

[44] Duran, M.J.; Salas, F.; Arahal, M.R., "Bifurcation Analysis of Five-Phase Induction Motor Drives With Third Harmonic Injection," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.2006-2014, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454355&isnumber=4505400 **V5**

[45] 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,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4471210&isnumber=4505400 **V5**

[46] Dwari, S.; Parsa, L., "Disturbance Free Operation of Permanent Magnet Motor Drives Under Short Circuit Faults Using Center-Split Winding," *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE* , vol., no., pp.1329-1334, 23-27 Sept. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4347955&isnumber=4347749 **V5**

[47] Dwari S. ; Parsa, L., "Optimal current waveforms for five-phase permanent magnet motor drives under open-circuit fault," Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , vol., no., pp.1-5, 20-24 July 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4596941&isnumber=4595968 **V5**

[48] Dwari, S.; Parsa, L.; Lipo, T.A., "Optimum Control of a Five-phase Integrated Modular Permanent Magnet Motor Under Normal and Open-Circuit Fault Conditions," *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE* , vol., no., pp.1639-1644, 17-21 June 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4342242&isnumber=4341940 **V5**

[49] Ede, J.D.; Atallah, K.; Jiabin Wang; Howe, D., "Effect of optimal torque control on rotor loss of fault-tolerant permanent-magnet brushless machines," *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.38, no.5, pp. 3291-3293, Sep 2002,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1042528&isnumber=22340 **V5**

[50] Edrington, C.S.; Minor, S.P., "Design and Analysis of a 5-phase DSRM Drive," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE* , vol., no., pp.364-369, 9-12 Sept. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4544153&isnumber=4544069 **V5**

[51] Faiz J., Tabatabaei I., "Extension of winding function theory for non uniform air gap in electric machinery", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 38, No. 6, Nov. 2002.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1158955&isnumber=25965

[52] Faiz, J.; Ardekanei, I.T.; Toliyat, H.A., "An evaluation of inductances of a squirrel-cage induction motor under mixed eccentric conditions," *Energy conversion, ieee transactions on* , vol.18, no.2, pp. 252-258, June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1201097&isnumber=27039

[53] Figueroa J., J. Cros and P. Viarouge, "Polyphase PM brushless DC motor for high reliability application", Proc. of EPE'03, Toulouse (France), Sept. 2003, CD-ROM.

[54] Figueroa J., J. Cros, P. Viarouge, "Current Control Strategies for Seven Phase Brushless DC Motors". Proc. of ICEM'02, Brugge (Belgium), August 2002, CDROM. **V7**

[55] Figueroa, J.; Cros, J.; Viarouge, P., "Generalized transformations for polyphase phase-Modulation motors," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.21, no.2, pp. 332-341, June 2006,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1634579&isnumber=34276

[56] Freitas, I.S.; Toliyat, H.A.; Jacobina, C.B.; Ozturk, S.B., "A PWM Strategy with Reduced Bearing Currents for Five-Phase Motors," *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE* , vol., no., pp.354-358, 9-12 Sept. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4544151&isnumber=4544069 **V5**

[57] Fu, J.-R.; Lipo, T.A., "A strategy to isolate the switching device fault of a current regulated motor drive," *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE* , vol., no., pp.1015-1020 vol.2, 2-8 Oct 1993
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=299023&isnumber=7405 **V6**

[58] Fu .R, 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=315238&isnumber=7605 **V6**

[59] Fukami T., Onchi T., Naoe N. and Hanaoka R.,"Compensation for Neutral Current Harmonics in a Three-Phase Four-Wire System by a Synchronous Machine", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, September/October 2002, pp. 1232-1236. **V3**

[60] Gao, Yuan; Parsa, Leila, "Modified Direct Torque Control of Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drives," *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE* , vol., no., pp.1428-1433, Feb. 25 2007-March 1 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4195907&isnumber=4195691 **V5**

[61] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=882102&isnumber=19070 **V5**

[62] Gerada, C.; Bradley, K.J.; Summer, M.; Wheeler, P., "Operating induction motor drives with turn-to-turn faults," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.770-776, 15-15 May 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531427&isnumber=32672 **V5**

[63] Gerada, C.; Bradley, K.; Xiaoyan Huang; Goodman, A.; Whitley, C.; Towers, G., "A 5-Phase Fault-Tolerant Brushless Permanent Magnet Motor Drive for an Aircraft Thin Wing Surface Actuator," *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International* , vol.2, no., pp.1643-1648, 3-5 May 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270896&isnumber=4270762 **V5**

[64] Gieras J. F., C. Wang, J. Cho Lai, "Noise of Polyphase Electric Motors", *Taylor & Francis book, CRC PRESS*, 2006, ISBN 0-8247-2381-3

[65] Gieras J., R. J. Wang, M. J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", pp 340, Kluwer Academic Publishers, 2004.

[66] Gierse, Georg; Schuermann, Wilhelm, "Microprocessor Control for Two Magnetically Coupled Three-Phase PWM Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.PE-1, no.3, pp.141-147, July 1986
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4766298&isnumber=4766293 **V6**

[67] Glasberger, T.; Peroutka, Z.; Molnar, J., "Comparison of 3D-SVPWM and Carrier-Based PWM of three-phase four-leg voltage source inverter," *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on* , vol., no., pp.1-9, 2-5 Sept. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4417539&isnumber=4417197 **V3**

[68] Gopalarathnam, T.; Toliyat, H.A.; Moreira, J.C., "Multi-phase fault-tolerant brushless DC motor drives," *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE* , vol.3, no., pp.1683-1688 vol.3, 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=882107&isnumber=19070. **V3**

[69] Grandi G., Serra G., Tani A., "Space vector modulation of a seven-phase voltage source inverter", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), May 2006, pp. 1149-1156. **V7**

[70] Grandi G., Serra G., Tani A., "General Analysis of Multi-Phase Systems Based on Space Vector Approach", Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2006), Slovenia, Aug. 2006, pp. 834-840.

[71] Grenier D., "Modélisation et stratégies de commande de machines synchrones à aimants permanents à forces contre-électromotrices non sinusoïdales", thèse de l'Ecole Normale Supérieur de Cachan, Septembre 1994.

[72] Hadiouche D., H. Razik, A. Rezzoug, "Study and simulation of space vector PWM control of double-star induction motor", CIEP 2000, Acapulco, Mexico, 15-19 Oct. 2000. **V6**

[73] Hadiouche, D., Baghli, L., Rezzoug, A., "Space vector PWM techniques for dual three-phase AC machine: analysis, performance evaluation and DSP implementation," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the* , vol.1, no., pp. 648-655 vol.1, 12-16 Oct. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1257571&isnumber=28116 **V6**

[74] Hadiouche, D., Razik, H., Rezzoug, A., "On the modeling and design of dual-stator windings to minimize circulating harmonic currents for VSI fed AC machines," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.40, no.2, pp. 506-515, March-April 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1278629&isnumber=28589. **V6**

[75] Hadiouche D., "Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure", *thèse de doctorat de l'UHP*, Nancy 1, décembre 2001.

[76] Hava, A.M.; Kerkman, R.J.; Lipo, T.A., "Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.14, no.1, pp.49-61, Jan 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=737592&isnumber=15896

[77] Haylock JA, Mecrow BC, Jack AG, and Atkinson DJ, "Operation of fault tolerant machines with winding failures", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol EC-14, No 4, pp1490-1495, 1999 **V3**

[78] Hendershot J. R., T. J. E. Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors". Magna physics publishing and clarendon press, Oxford, pp. 5-56, 1994.

[79] Hodge C., S.Williamson, S. Smith, « Direct Drive Marine Propulsion Motors », International Congress on Electrical Machines (ICEM'02), August 2002, Brugges (Belgium), CD-ROM.

[80] Huang S.; Jian Luo; Leonardi, F.; Lipo, T.A., "A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.14, no.2, pp.185-192, Jun 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=766982&isnumber=16622

[81] Huang S. ; Aydin, M.; Lipo, T.A., "TORUS concept machines: pre-prototyping design assessment for two major topologies," *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE* , vol.3, no., pp.1619-1625 vol.3, 30 Sep-4 Oct 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=955751&isnumber=20674

[82] Huang S.; Aydin, M.; Lipo, T.A., "Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted permanent magnet machines," *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE* , vol.3, no., pp.1603-1610 vol.3, 30 Sep-4 Oct 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=955749&isnumber=20674

[83] Iqbal A., Levi E., "Space vector PWM techniques for sinusoidal output voltage generation with a five-phase voltage source inverter", Electr. Power Compon. Syst., vol. 34, n°2, Feb. 2006, pp. 119-140. **V5**

[84] Iqbal, A.; Vukosavic, S.; Levi, E.; Jones, M.; Toliyat, H.A., "Dynamics of a series-connected two-motor five-phase drive system with a single-inverter supply," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* , vol.2, no., pp. 1081-1088 Vol. 2, 2-6 Oct. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1518491&isnumber=32506 **V5**

[85] Iqbal A., Levi E., Jones M., Vukosavic S.N., "A PWM Scheme for a Five-Phase VSI Supplying a Five-Phase Two-Motor Drive", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on* , vol., no., pp.2575-2580, 6-10 Nov. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4152831&isnumber=4152825 **V5**

[86] Iqbal A., Levi E., Jones M., Vukosavic S.N., "Generalised Sinusoidal PWM with Harmonic Injection for Multi-Phase VSIs", Power Electronics Specialists Conference, (PESC), June 2006, pp. 1-7.

[87] Jack A. G., B. C. Mecrow, J. A Haylock, "A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.32, no.4, pp.889-895, Jul/Aug 1996
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=511646&isnumber=11125 **V6**

[88] Jacobina, C.B.; de Rossiter Correa, M.B.; Pinheiro, R.F.; da Silva, E.R.C.; Lima, A.M.N., "Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.37, no.6, pp.1807-1816, Nov/Dec 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=968195&isnumber=20886. **V3**

[89] Jacobina, C.B.; Miranda, R.S.; Correa, M.B.D.R.; Lima, A.M.N., "Disturbance-free operation of a six-phase ac motor drive system," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.2, no., pp. 925-931 Vol.2, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355543&isnumber=29760 **V6**

[90] Jacobina C.B., I.S. Freitas, T.M. Oliveira, E.R.C. Da Silva, , A.M.N. Lima, 'Fault tolerant control of five-phase AC motor drive', *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.5, no., pp. 3486-3492 Vol.5, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355091&isnumber=29762. **V5**

[91] Jahns T. M., "Improved reliability in solid state ac drives by means of multiple independent phase-drive units", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-16, May-June 1980, pp. 321-331.

[92] Jang D., "PWM Methods for two-phase inverters", IEEE industry Applications magazine, vol. 13, n°2, March-April 2007, pp. 50-61.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4117398&isnumber=4116826 **V2**

[93] Jones, M.; Levi, E.; Iqbal, A., "A five-phase series-connected two-motor drive with current control in the rotating frame," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.5, no., pp. 3278-3284 Vol.5, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355054&isnumber=29762 **V5**

[94] Joksimovic, G.M.; Durovic, M.D.; Penman, J.; Arthur, N., "Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines-winding function approach", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, pp. 143-148, June2000.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=866991&isnumber=18774 **V3**

[95] Julian, A.L.; Oriti, G.; Lipo, T.A., "Elimination of common-mode voltage in three-phase sinusoidal power converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.14, no.5, pp.982-989, Sep 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=788504&isnumber=17083 **V3**

[96] Keith B., Ramesohl I., Reck S., Schwab H. and Sturtzer G., "Evaluation of the reliability of an automotive permanent magnet synchronous motor drive", Proc. of EPE'03, CD-ROM, Toulouse (France), September 2003.

[97] Kelly J.W., Strangas E.G., Miller J.M., "Multiphase space vector pulse width modulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, n°2, June 2003, pp. 259-264
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4311803&isnumber=22408.**V6**

[98] Kianinezhad R., B. Nahid-Mobarakeh, L. Baghli, F. Betin, G.A. Capolino, Kianinezhad, R.; Nahid-Mobarakeh, B.; Baghli, L.; Betin, F.; Capolino, G.A., "Torque Ripples Suppression for Six-Phase Induction Motors Under Open Phase Faults," *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on* , vol., no., pp.1363-1368, 6-10 Nov. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4153597&isnumber=4152825. **V6**

[99] Kianinezhad, R.; Nahid-Mobarakeh, B.; Baghli, L.; Betin, F.; Capolino, G.-A., "Modeling and Control of Six-Phase Symmetrical Induction Machine Under Fault Condition Due to Open Phases," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1966-1977, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454445&isnumber=4505400 **V6**

[100] Kim J.H., Sul S.K, Jang-Hwan Kim; Seung-Ki Sul, "A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.19, no.1, pp. 66-75, Jan. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1262054&isnumber=28213. **V3**

[101] Kim J.H., Sul S.K; Enjeti, P.N., "A Carrier-Based PWM Method With Optimal Switching Sequence for a Multilevel Four-Leg Voltage-Source Inverter," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.44, no.4, pp.1239-1248, July-aug. 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4578795&isnumber=4578767 **V3**

[102] Kjellqvist P.. "Modeling and design of electromechanical actuators for active suspension in rail vehicles". PhD thesis Royal Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm (Sweden), 2002.

[103] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4158030&isnumber=4158021. **V6**

[104] Klingshirn, E.A., "High Phase Order Induction Motors - Part I-Description and Theoretical Considerations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* , vol.PAS-102, no.1, pp.47-53, Jan. 1983
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4111788&isnumber=4111779

[105] Klingshirn, E.A., "High Phase Order Induction Motors - Part II-Experimental Results," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* , vol.PAS-102, no.1, pp.54-59, Jan. 1983
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4111789&isnumber=4111779
[106] Kron G. in *Tensor analysis of Networks*, edited by John Wiley and Sons, London, 1939
[107] Kron G. in *Equivalent circuits of electric machinery*, edited by Dover Edition, 2nd edition, 1966.
[108] Kwak S., Toliyat H.A. "An Approach to Fault-Tolerant Three-Phase Matrix Converter Drives," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.22, no.4, pp.855-863, Dec. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4374040&isnumber=4374037 **V3**
[109] Kwasinski A., Krein P.T., "An integrated approach to PWM through 3-dimensional visualization," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* , vol.6, no., pp. 4202-4208 Vol.6, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1354743&isnumber=29758. **V3**
[110] Lee H.; Sul S., "Common-mode voltage reduction method modifying the distribution of zero-voltage vector in PWM converter/inverter system," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.37, no.6, pp.1732-1738, Nov/Dec 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=968185&isnumber=20886 **V3**
[111] Letelier A., J. A. Tapia, R. Wallace, A. Valenzuela, "Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine with Extended Speed Range", Electric Machines and Drives, IEEE International Conference, pp. 1261-1267, 15 May 2005.
[112] Levi E., "Multiphase Electric machines for Variable Speed Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, n°5, May 2008, pp. 1893-1909
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454446&isnumber=4505400. **Vn**
[113] Levi E., M. Jones, S. N. Vukosavic, H. A. Toliyat, "A novel Concept of a Multi-phase, Multi-motor Vector Controlled Drive System Supplied From a Single Voltage Source Inverter", *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.19, no.2, pp. 320-335, March 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1271315&isnumber=28467 **Vn**
[114] Levi E., R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, S. Williamson, "Multiphase induction motor drives- A technology status review", *Electric Power Applications, IET*, Vol. 1, issue 4, pp. 489-516, July 2007.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4264390&isnumber=4264389. **Vn**
[115] Levi, E.; Jones, M.; Vukosavic, S.N.; Iqbal, A.; Toliyat, H.A., "Modeling, Control, and Experimental Investigation of a Five-Phase Series-Connected Two-Motor Drive With Single Inverter Supply," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.3, pp.1504-1516, June 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4155077&isnumber=4142913 **V5**
[116] Levi, E.; Dujic, D.; Jones, M.; Grandi, G., "Analytical Determination of DC-Bus Utilization Limits in Multiphase VSI Supplied AC Drives," *Energy conversion, ieee transactions on* , vol.23, no.2, pp.433-443, June 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4505394&isnumber=4505383 **Vn**
[117] Lin H., Zou Y., He B., "The Vector Control Strategies for Multiphase Synchronous Motor Drive Systems," *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* , vol.3, no., pp.2205-2210, July 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4078590&isnumber=4078480 v12
[118] Liu, J.; Hu, J.; Xu, L., "Design and control of a kilo-amp DC/AC inverter for integrated starter-generator (ISG) applications," *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.4, no., pp. 2754-2761 vol.4, 3-7 Oct. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348864&isnumber=29652
[119] Loh P. C., D.G. Holmes, " A multidimensional variable band flux modulator for four-phase-leg voltage source inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, Issue 2, March 2003, pp. 628 – 635 **V3**
[120] López O., Álvarez J. , Doval-Gandoy J. , Freijedo F. D.,"Multilevel Multiphase Space Vector PWM Algorithm", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1933-1942, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4505406&isnumber=4505400.
[121] Louis J.P., « Modèles pour la commande des actionneurs électriques », Traité EGEM, série Génie électrique, Hermes, 1ere édition, 2004. Chapitre 4.
[122] Lyra R. O. C., "Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection", Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 2002. **V6**
[123] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1035189&isnumber=22216 **V6**
[124] Marouani K., Baghli, L., Hadiouche, D., Kheloui A., Rezzoug A "A New PWM Strategy Based on a 24-Sector Vector Space Decomposition for a Six-Phase VSI-Fed Dual Stator Induction Motor," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1910-1920, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454447&isnumber=4505400. **V6**
[125] Martin J. P., "Contribution à l'Alimentation en tension de Machines Synchrones à Aimants Permanents à Nombre de Phase Elevé : Fonctionnement Normal et Dégradé", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 22/07/03.

[126] Martin J. P., F. Meibody-Tabar and B. Davat, "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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=882111&isnumber=19070
[127] Martin J.P., Semail E., Pierfederici S., Bouscayrol A., Meibody-Tabar F., Davat B., "Space Vector Control of 5-phase PMSM supplied by q H-bridge VSIs", ElectrIMACS 2002, Montreal, August 2002. **V5**
[128] Martin J.P., Pierfederici S., Meibody-Tabar F., Davat B., **"**Synthèse des méthodes de filtrage du couple des MSAP polyphasées en modes normal et dégradé », RIGE Vol. 10 N° 1-2/2007 , pp.117-149
[129] Max L. ,Wang J., K. Atallah K., Howe D., "Real-time optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines", Journal of Applied Physics Vol. 97(10), 2005. **Vn**
[130] Mecrow, B.C.; Jack, A.G.; Haylock, J.A.; Coles, J., "Fault-tolerant permanent magnet machine drives," *Electric Power Applications, IEE Proceedings* - , vol.143, no.6, pp.437-442, Nov 1996
URL: http://www.ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=553460&isnumber=12019, **V6**.
[131] Mecrow, B.C.; Atkinson, D.J.; Jack, A.G.; Green, S.; Haylock, J.A.; Coles, J., "The need for fault tolerance in an aeroengine electric fuel control system," *Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft (Ref. No. 1999/180), IEE Colloquium on* , vol., no., pp.9/1-9/5, 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=828629&isnumber=17995, **V3**
[132] Menneron F., M. F. Benkhoris, A. Guéraud, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone double-étoile alimentée en tension pour la propulsion par POD", La conversion électromécanique directe, ENS de Cachan, Fév. 1999. **V6**
[133] Merabtene M., M. F. Benkhoris, "Modelling of DSSM fed by PWM inverters under fault condition", Proc. of ICEM'02, Brugge (Belgium), August 2002, CDROM. **V6**
[134] Merabtene M., M. F. Benkhoris, N.Mokhtari, R. Le Doeuff, "Torque strategies control of the double star synchronous machine drive under fault condition", Proc. of ICEM'02, Brugge (Belgium), August 2002, CDROM. **V6**
[135] Merabtene M., M. F. Benkhoris, R. Le Doeuff, "An unified model to control the DSSM PWM inverter set under balanced and unbalanced functioning", Proc. of EPE2003, Toulouse (France), September 2003. **V6**
[136] Minglan Lin; Srivastava, A.K.; Schulz, N.N., "A Generic Digital Model of Multiphase Synchronous Generator for Shipboard PowerSystem," *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE* , vol., no., pp.348-355, 21-23 May 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4233845&isnumber=4233785 **V6**
[137] Monmasson E., Faucher J., « Projet pédagogique autour de la M.L.I. vectorielle», Revue 3EI n°8 mars 1997
[138] Mohapatra, K.K.; Kanchan, R.S.; Baiju, M.R.; Tekwani, P.N.; Gopakumar, K., "Independent field-oriented control of two split-phase induction motors from a single six-phase inverter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.52, no.5, pp. 1372-1382, Oct. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1512470&isnumber=32387 **V6**
[139] Moubayed N., F. Meibody-Tabar, B. Davat, I. Rasoanarivo, "Conditions of Safety Supplying of DSIM by two PWM-VSI", EPE '99, Lausanne. **V6**
[140] 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. **V6**
[141] Moubayed N., F. Meybody-Tabar, B. Davat, "Study and simulation of magnetically coupled multi stator induction machine supplied by independent three phase voltage-source inverters", Electrimacs'99, Lisboa, Portugal, pp. 59-64, Sept. 1999. **V6**
[142] Munoz, A.R.; Lipo, T.A., "Dual stator winding induction machine drive," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.36, no.5, pp.1369-1379, Sep/Oct 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=871286&isnumber=18871 **V6**
[143] Nelson, R.H.; Krause, P.C., "Induction Machine Analysis for Arbitrary Displacement Between Multiple Winding Sets," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* , vol.PAS-93, no.3, pp.841-848, May 1974
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4075429&isnumber=4075415
[144] Nogarède B., "Etude de moteurs sans encoches à aimants permanents de forte puissance à basse vitesse", Thèse de doctorat préparée au LEEI de l'ENSEEIHT, 07/06/90.
[145] Ouyang W.; Lipo, T.A., "Multiphase Modular Permanent Magnet Drive System Design and Realization," *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International* , vol.1, no., pp.787-792, 3-5 May 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4270741&isnumber=4270600 **V5**
[146] Ojo, O.; Gan Dong, "Generalized discontinuous carrier-based PWM modulation scheme for multi-phase converter-machine systems," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* , vol.2, no., pp. 1374-1381 Vol. 2, 2-6 Oct. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1518539&isnumber=32506 **Vn**
[147] Ojo O.; Gan Dong; Zhiqiao Wu, "Pulse-Width Modulation for Five-Phase Converters Based on Device Turn-on Times," *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE* ,

vol.2, no., pp.627-634, 8-12 Oct. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4025278&isnumber=4025258

[148] Ojo, O., "The generalized discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.51, no.6, pp. 1280-1289, Dec. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1360067&isnumber=29830 **Vn**

[149] Oguchi, K.; Kawaguchi, A.; Kubota, T.; Hoshi, N., "A novel six-phase inverter system with 60-step output voltages for high-power motor drives," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.35, no.5, pp.1141-1149, Sep/Oct 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=793376&isnumber=17214 **V6**

[150] Paap, G.C., "Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.15, no.2, pp.522-528, May 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=867135&isnumber=18773

[151] Parsa, L.; Toliyat, H.A., "Sensorless direct torque control of five-phase interior permanent magnet motor drives," *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.2, no., pp. 992-999 vol.2, 3-7 Oct. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348534&isnumber=29650 **V5**

[152] Parsa L., H. A. Toliyat, "Multi-phase permanent magnet motor drives," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the* , vol.1, no., pp. 401-408 vol.1, 12-16 Oct. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1257532&isnumber=28116. **Vn**

[153] Parsa, L.; Toliyat, H.A., "Fault-tolerant five-phase permanent magnet motor drives," *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.2, no., pp. 1048-1054 vol.2, 3-7 Oct. 2004,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348542&isnumber=29650 **V5**

[154] Parsa, L.; Toliyat, H.A., "Five-phase interior permanent magnet motor with low torque pulsation," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* , vol.3, no., pp. 1770-1775 Vol. 3, 2-6 Oct. 2005, URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1518686&isnumber=32507 **V5**

[155] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1388658&isnumber=30219, **Vn**

[156] Parsa, L.; Toliyat, H.A., "Five-phase permanent magnet motor drives for ship propulsion applications," *Electric Ship Technologies Symposium, 2005 IEEE* , vol., no., pp. 371-378, 25-27 July 2005,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1524702&isnumber=32591

[157] Parsa, L.; Kim, N.; Toliyat, H.A., "Field Weakening Operation of High Torque Density Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives," *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on* , vol., no., pp. 1507-1512, 15-18 May 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1531538&isnumber=32672 **V5**

[158] Parsa, L..; Toliyat, H.A., "Fault-Tolerant Interior-Permanent-Magnet Machines for Hybrid Electric Vehicle Applications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.56, no.4, pp.1546-1552, July 2007,
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4273747&isnumber=4273706 **V5**

[159] Parsa, L.; Toliyat, H. A.; Goodarzi, A., "Five-Phase Interior Permanent-Magnet Motors With Low Torque Pulsation," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.43, no.1, pp.40-46, Jan.-feb. 2007
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4077209&isnumber=4077182 **V5**

[160] Pasqualini G. «Alimentation par convertisseurs statiques : régimes transitoires» Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Électrique. D3 562.

[161] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4353&isnumber=238 **V5**

[162] Perales M.A., Prats M.M., Portillo R., Mora J.L., Leon J.I., Franquelo L.G., "Three-dimensional space vector modulation in abc coordinates for four-leg voltage source converters," *Power Electronics Letters, IEEE* , vol.1, no.4, pp. 104-109, Dec. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1274213&isnumber=28515. **V3**

[163] Pyrhönen J., Kurronen P., Parviainen A., " Permanent Magnet 3 MW Low-Speed Generator Development", Proc. of ICEM'06, Chania, (Greece), Sept. 2006, CD-ROM. **V3**

[164] Rakgati, E.T.; Kamper, M.J.; Le Roux, A.D., "Torque Performance of Optimally Designed Six-Phase Reluctance DC Machine," *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE* , vol.3, no., pp.1186-1192, 8-12 Oct. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4025369&isnumber=4025345

[165] Rakgati, E.T.; Karnper, M.J., "Torque performance of optimally designed three and five phase reluctance synchronous machines with two rotor structures," *AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa* , vol.1, no., pp.625-629

Vol.1, 17-17 Sept. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1406754&isnumber=30507 **V5**

[166] Rahman K., N. Patel, T. Ward, J. Nagashima, F. Caricchi, F. Crescimbini, "Application of Direct Drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle Propulsion System", Proc. of IEEE-IAS'04, Seattle (USA), Oct. 2004, CD-ROM.

[167] Robert-Dehault E., M. F. Benkhoris and E. Semail, "Study of a 5-phases synchronous machine fed by PWM inverters under fault conditions", Proc. of ICEM2002, Brugge (Belgium), August 2002, CD-ROM. **V5**

[168] Ryan M.J., Lorenz R.D., De Doncker R., "Modeling of multileg sine-wave inverters: a geometric approach", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.46, no.6, pp.1183-1191, Dec 1999
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=808008&isnumber=17505.

[169] Ryu H. M., Kim J. H., Sul S. K., "Synchronous frame current control of multi-phase synchronous motor. Part I. Modeling and current control based on multiple d-q spaces concept under balanced condition," *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.1, no., pp.-63, 3-7 Oct. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348388&isnumber=29649 **V5**

[170] Ryu H. M., Kim J. H., Sul S. K., "Synchronous Frame Current Control of Multi-Phase Synchronous Motor, Part II. Asymmetric Fault Condition due to Open Phases", *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE* , vol.1, no., pp.-275, 3-7 Oct. 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1348420&isnumber=29649. **V5**

[171] Ryu H. M., J. H. Kim, S. K. Sul, "Analysis of multi-phase space vector pulse-width modulation based on multiple d-q spaces concept", *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.20, no.6, pp. 1364-1371, Nov. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1528610&isnumber=32645. **V5**

[172] Ryu H. M., Kim J. H., Sul S. K.,, "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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1658337&isnumber=34719 **V5**

[173] Scharlau, C.C.; Pereira, L.F.A.; Pereira, L.A.; Haffner, S., "Performance of a Five-Phase Induction Machine With Optimized Air Gap Field Under Open Loop V/f Control," *Energy conversion, ieee transactions on* , vol.23, no.4, pp.1046-1056, Dec. 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4675793&isnumber=4675791 **V5**

[174] Shamsi-Nejad M.M., Nahid-Mobarakeh B.B., Pierfederici S.S., Meibody-Tabar F., "Fault Tolerant and Minimum Loss Control of Double-Star Synchronous Machines Under Open Phase Conditions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1956-1965, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4454448&isnumber=4505400. **V6**

[175] Shi R., H. A. Toliyat, A. El-Antably, "Field Oriented Control of Five-phase Synchronous Reluctance Motor Drive with Flexible 3rd Harmonic Current Injection for High Specific Torque", *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE* , vol.3, no., pp.2097-2103 vol.3, 30 Sep-4 Oct 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=955915&isnumber=20674 **V5**

[176] Shi, R.; Toliyat, H.A., "Vector control of five-phase synchronous reluctance motor with space vector pulse width modulation (SVPWM) for minimum switching losses ," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE* , vol.1, no., pp.57-63 vol.1, 2002
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=989227&isnumber=21321 **V5**

[177] Siala S., E. Guette, J. L. Pouliquen, "Multi-inverter PWM control: a new generation drives for cruise ship electric propulsion", Proc. of EPE2003, Toulouse (France), September 2003, CDROM. **V6**

[178] Simoes G., Vieira P., "A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine - A Perspective Application for electric vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.49, no.5, pp. 1154-1164, Oct 2002
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1036811&isnumber=22237 **V5**

[179] Simoes G. , Vieira P., "A Five-Phase Brushless DC-Machine Direct Drive System", EPE Journal, vol. 14, no. 3, august 2004, http://www.epe-association.org/epe/index.php

[180] Sturtzer G., D. Flieller, J. P. Louis, "Modèles pour la commande des actionneurs électriques", Traité EGEM, série Génie électrique, Chapitre 3, Application de la transformation de Park aux machines à distribution de flux non sinusoïdale. Extension de Park pour les machines à entrefer constant, 2-7462-0917-9, Juillet 2004.

[181] Sturtzer G., » Modèle inverse et réduction de l'ondulation de couple pour machines synchrones déduits des courbes isocouples : extension de la transformation de Park pour moteurs synchrones à pôles saillants non sinusoïdaux et saturés», thèse de l'Ecole normale supérieure de Cachan, Cachan, France, 2001

[182] Surong H., X. Guodong, "Optimization of power density in axial-flux machine through generalized sizing equations". Journal of Shanghai University, vol. 1, no.3, 1997.

[183] Tabatabaei, I.; Faiz, J.; Lesani, H.; Nabavi-Razavi, M.T., "Modeling and Simulation of a salient-pole synchronous Generator with dynamic eccentricity using modified winding function theory," *Magnetics, IEEE Transactions on* ,

vol.40, no.3, pp. 1550-1555, May 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1298926&isnumber=28857
[184] Terrien, "Commande d'une machine synchrone double étoile alimentée par des onduleurs MLI. Modélisation, simulation et prototype experimental", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 07/12/2000. **V6**
[185] 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
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=245714&isnumber=6301 V3
[186] Toliyat, H.A.; Rahimian, M.M.; Lipo, T.A., "dq modeling of five phase synchronous reluctance machines including third harmonic of air-gap MMF," *Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE* , vol., no., pp.231-237 vol.1, 28 Sep-4 Oct 1991
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=178160&isnumber=4487
[187] Toliyat, H.A., "Analysis and simulation of five-phase variable-speed induction motor drives under asymmetrical connections," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.13, no.4, pp.748-756, Jul 1998
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=704150&isnumber=15224 **V5**
[188] Toliyat H. A., "Analysis of Concentrated Winding Induction and Reluctance Machines for Adjustable Speed Drive Application", Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 1991.
[189] Toliyat, H.A.; Arefeen, M.S.; Parlos, A.G., "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.32, no.4, pp.910-918, Jul/Aug 1996
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=511649&isnumber=11125 V3
[190] Toliyat, H.A.; Xu, L.; Lipo, T.A., "A five-phase reluctance motor with high specific torque," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.28, no.3, pp.659-667, May/Jun 1992
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=137454&isnumber=3741 **V5**
[191] Toliyat H. A., N. Qahtany, "Finite Element Analysis of a Concentrated Winding Multi-Phase Induction Machine", Proc. of ICEM'02, Brugge (Belgium), August 2002, CDROM.
[192] Toliyat H. A., S. P. Waikar, T.A. Lipo, "Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap MMF," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.34, no.2, pp.332-339, Mar/Apr 1998
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=663476&isnumber=14535. **V5**
[193] Toliyat H. A., S. Ruhe, X. Huansheng, "A DSP-based vector control of five-phase synchronous reluctance motor," *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE* , vol.3, no., pp.1759-1765 vol.3, 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=882118&isnumber=19070. **V5**
[194] Toliyat H. A., T. A. Lipo, J. C. White, "Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Application Part I (Motor Analysis)", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 4, pp. 679-683, 1991. **Vn**
[195] Toliyat H. A., T. A. Lipo, J. C. White, "Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications-part II (Motor Design and Performance)", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 4, pp. 685-692, Dec. 1991. **Vn**
[196] Toliyat, H.A.; Al-Nuaim, N.A., "Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient pole synchronous machines," *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE* , vol.1, no., pp.255-262 vol.1, 5-9 Oct 1997
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=643036&isnumber=13803
[197] Toliyat, H.A.; Shi, R.; Huangsheng Xu, "A DSP-based vector control of five-phase synchronous reluctance motor," *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE* , vol.3, no., pp.1759-1765 vol.3, 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=882118&isnumber=19070 **V5**
[198] Vizireanu D., X. Kestelyn, S. Brisset, P. Brochet, Y. Milet, D. Laloy, "Polyphased Modular Direct-Drive Wind Turbine Generator", *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on* , vol., no., pp. 9 pp.-, 11-14 Sept. 2005
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1665848&isnumber=34861 V9
[199] Wallmark, O.; Harnefors, L.; Carlson, O., "Control Algorithms for a Fault-Tolerant PMSM Drive," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.4, pp.1973-1980, Aug. 2007
URL: http://www.ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4273673&isnumber=4265775 **V3**
[200] Wang J., K. Atallah, D. Howe, "Optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines", *Magnetics, IEEE Transactions on* , vol.39, no.5, pp. 2962-2964, Sept. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1233273&isnumber=27635 . **V5**
[201] Welchko B., Jahns T., Soong W., Nagashima J., "IPM synchronous machine drive response to symmetrical and asymmetrical short circuit faults," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.18, no.2, pp. 291-298, June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1201102&isnumber=27039. **V3**
[202] Welchko B.A., Jahns, T.M., Lipo T.A., "Short-circuit fault mitigation methods for interior PM synchronous machine drives using six-leg inverters," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* ,

vol.3, no., pp. 2133-2139 Vol.3, 20-25 June 2004
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1355448&isnumber=29761. **V3**

[203] 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," *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International* , vol.1, no., pp. 539-546 vol.1, 1-4 June 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1211315&isnumber=27264 **V3**

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

[205] Williamson S. and S. Smith, "Fault tolerance in multiphase propulsion motors", Journal of Marine Engineering and Technology, no. A4 2004.

[206] Williamson S., Smith S., "Pulsating Torque and Losses in Multi-phase Induction Machines", *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.39, no.4, pp. 986-993, July-Aug. 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1215429&isnumber=27337

[207] Williamson, S.; Smith, S., Man-Chung Wong; Jing Tang; Ying-Duo Han, "Cylindrical coordinate control of three-dimensional PWM technique in three-phase four-wired trilevel inverter," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.18, no.1, pp. 208-220, Jan 2003
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1187340&isnumber=26625 **V3**

[208] Xu L. , "Rotor structure selections of nonsine five-phase synchronous reluctance machines for improved torque capability," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.36, no.4, pp.1111-1117, Jul/Aug 2000
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=855967&isnumber=18584 **V5**

[209] Xu L., W. N. Fu, "Evaluation of Third Harmonic Component Effects in Five-Phase Synchronous Reluctance Motor Drive Using Time-Stepping Finite-Element Method", Industry *Applications, IEEE Transactions on* , vol.38, no.3, pp.638-644, May/Jun 2002
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1003412&isnumber=21652. **V5**

[210] Xu H., Toliyat, H.A.; Petersen, L.J., "Rotor field oriented control of five-phase induction motor with the combined fundamental and third harmonic currents," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE* , vol.1, no., pp.392-398 vol.1, 2001
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=911677&isnumber=19685 **V5**

[211] Xu H. ., H. A. Toliyat, L. J. Petersen, "Five-Phase Induction Motor Drives With DSP-Based Control System", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no 4, pp. 524-533, July 2002. **V5**

[212] Xue S. ; Xuhui Wen; Zhao Feng, "Multiphase Permanent Magnet Motor Drive System Based on A Novel Multiphase SVPWM," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC '06. CES/IEEE 5th International* , vol.1, no., pp.1-5, Aug. 2006
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4078146&isnumber=4078021

[213] Yuefeng L., Feng L., Lipo T.A, "A novel permanent magnet motor with doubly salient structure," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.31, no.5, pp.1069-1078, Sep/Oct 1995
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=464521&isnumber=9732. **V3**

[214] Yu F.; Xiaofeng Zhang; Minzhong Qiao; Chengdong Du, "The direct torque control of multiphase permanent magnet synchronous motor based on low harmonic space vector PWM," *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-5, 21-24 April 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4608494&isnumber=4608308 **V5**

[215] Zheng L., Fletcher J.E., Williams B.W., Xiangning He, "Dual-Plane Vector Control of a Five-Phase Induction Machine for an Improved Flux Pattern," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.55, no.5, pp.1996-2005, May 2008
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4451075&isnumber=4505400 **V5**

[216] Zhang B., H. Bai, S. D. Pekarek, W. Eversman, R. Krefta, G. Holbrook, D. Buening, “Comparison of 3-, 5-, and 6-Phase Machines For Automotive Charging Applications” International Electric Machines and Drives Conference, EMDC’03 USA, 1-4, vol.3, pp.:1357 – 1362, June 2003.

[217] Zhang R.; Prasad, V.H.; Boroyevich, D.; Lee, F.C, “ Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters”, IEEE Transactions of Power Electronics, Volume 17, Issue 3, May 2002, pp. 314 – 326.
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1004239&isnumber=21683**V3**

[218] Zhao Y., "Vector space decomposition modelling and control of multiphase induction machines", Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 1995. **V6**.

[219] Zhao Y., T. A. Lipo, "Space Vector PWM Control of Dual Three-Phase Induction Machine Using Space Vector Decomposition", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31 no.5, pp 1100-1109, Sep./Oct. 1995
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=464525&isnumber=9732. **V6**.

[220] Zhao, Y.; Lipo, T.A., "Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.11, no.3, pp.570-577, Sep 1996,Part I
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=537009&isnumber=11551 **V6**.

[221] Zhao, Y.; Lipo, T.A., "Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance," *Energy Conversion, IEEE Transaction on* , vol.11, no.3, pp.578-584, Sep 1996, Part II
URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=537028&isnumber=11551 **V6**.

[222] Zhou K. , Wang D., "Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, n°1, 2002, pp. 186-196.

ANNEXES

Modélisation vectorielle des onduleurs de tension

Cette partie a été rédigée en collaboration avec X. Kestelyn dans le cadre de la préparation d'un chapitre d'ouvrage [O3]

35. Structure à n-bras : terminologie, notations et exemples

1.1 Structure générale à n-bras

On considère un onduleur de tension parfait deux niveaux à *n*-bras. Sa représentation en Figure A.1. fait apparaître d'une part les tensions v_{kN} ($k \in \{1,\ldots, n\}$) définies par rapport à un point neutre fictif *N* qui sert de référence de potentiel et d'autre part les fonctions de connexions $s_k \in \{0,1\}$ des interrupteurs.

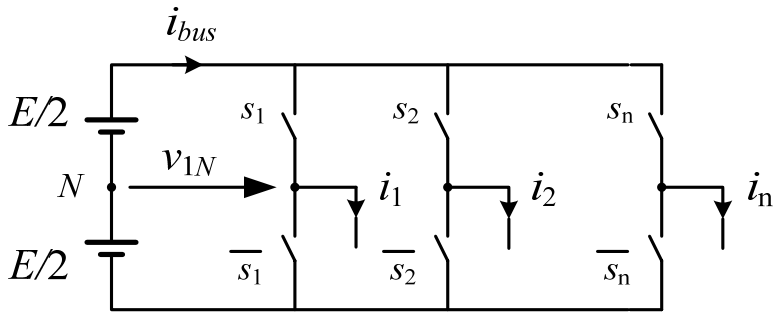


Figure A.1. Onduleur de tension à n-bras

L'onduleur agit sur la source polyphasée en imposant un ensemble de tensions v_{kN}. Cette source impose en réaction un ensemble de courants i_k qui est à l'origine du courant i_{bus} qui circule dans la source de tension continue de valeur *E*.

Le choix des valeurs des fonctions de connexion permet d'agir sur les tensions v_{kN} imposées côté polyphasé et sur le courant imposé côté continu i_{bus}. Une contrainte sur le courant côté continu se traduira ainsi par une contrainte sur l'ensemble des tensions v_{kN}.

L'utilisation d'une approche vectorielle [T1], [R2] se justifie car elle permet facilement de manipuler une grandeur, qui représente ici de façon unique l'ensemble des *n* tensions, indépendamment de ses coordonnées. Bien évidemment au sens strict les approches matricielles [70] lui sont équivalentes même si, de par leur nature, il est alors nécessaire de toujours spécifier la base d'étude.

On associe donc à l'onduleur *n*-bras un espace vectoriel Euclidien E^n de dimension *n*, muni d'une base orthonormée $B^n = \left\{\vec{x}_1^n, \vec{x}_2^n, ..., \vec{x}_n^n\right\}$. L'onduleur impose donc côté polyphasé un vecteur tension défini par :

$$\vec{v} = v_{1N}\vec{x}_1^n + v_{2N}\vec{x}_2^n + ... + v_{nN}\vec{x}_n^n = \sum_{k=1}^{n} v_{kN}\vec{x}_k^n \qquad [A.1]$$

Etant donné que la fonction de connexion $s_k \in \{0,1\}$, il vient que chaque tension v_{kN} appartient à l'ensemble $\{E/2, -E/2\}$. De ce fait, on peut définir une famille de vecteurs tension, caractéristique de l'onduleur. Cette famille comporte $G_v = 2^n$ éléments notés $\vec{v}_k$, correspondant au nombre de combinaisons possibles des interrupteurs. L'indice *k* de numérotation d'un des vecteurs $\vec{v}_k$ caractéristiques est défini par $k = s_1 2^0 + s_2 2^1 + ... + s_n 2^{n-1}$ avec :

$$\vec{v}_k = \overrightarrow{OM_k} = E\left(s_1 - \frac{1}{2}\right)\vec{x}_1^n + E\left(s_2 - \frac{1}{2}\right)\vec{x}_2^n + ... + E\left(s_n - \frac{1}{2}\right)\vec{x}_n^n \qquad [A.2]$$

O est une origine pour l'espace vectoriel et M_k sont les sommets de la figure géométrique ainsi définie. Dans la suite, on ne distinguera pas ces sommets M_k des vecteurs $\vec{v}_k$ eux-mêmes.

On qualifiera la base B^n de base « naturelle » dans la mesure où les coordonnées du vecteur tension dans cette base sont des grandeurs qui correspondent à des grandeurs physiques qu'il est possible de mesurer. D'autres bases de travail seront définies ultérieurement.

1.2 Exemples

Structure à un seul bras

A cette structure, la plus basique, on associe un espace euclidien de dimension unitaire. La base se réduit à un vecteur $B^1 = \left\{\vec{x}_1^n\right\}$ et le vecteur tension $\vec{v} = v_{1N}\vec{x}_1^n$ ne peut donc prendre que deux valeurs : $\vec{v}_0 = -\frac{E}{2}\vec{x}_1^n$ ou $\vec{v}_1 = \frac{E}{2}\vec{x}_1^n$.

Les différentes valeurs que peuvent prendre le vecteur tension sont représentées de façon graphique à la Figure A.2.

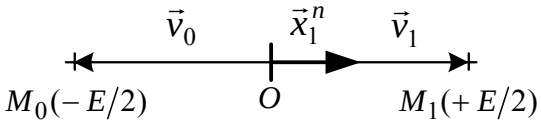


Figure A.2. Représentation vectorielle des tensions issues d'une structure à 1 bras

Structure à deux bras

Le vecteur tension appartient à un espace à 2 dimensions et peut prendre 4 valeurs :

$$\vec{v}_0 = -\frac{E}{2}\vec{x}_1^n - \frac{E}{2}\vec{x}_2^n \quad \vec{v}_1 = +\frac{E}{2}\vec{x}_1^n - \frac{E}{2}\vec{x}_2^n$$

$$\vec{v}_2 = -\frac{E}{2}\vec{x}_1^n + \frac{E}{2}\vec{x}_2^n \quad \vec{v}_3 = +\frac{E}{2}\vec{x}_1^n + \frac{E}{2}\vec{x}_2^n$$

La représentation graphique de l'onduleur est donnée à la Figure A.3. Les quatre sommets M_1 à M_4 du polygone « carré » caractérisent de façon géométrique l'onduleur. Si on considère que physiquement deux bras ne peuvent commuter au même instant, deux vecteurs successifs ne pourront différer que par une seule coordonnée. Sur la Figure A.3., le passage d'un vecteur à un autre impose donc de suivre un parcours fléché en pointillés.

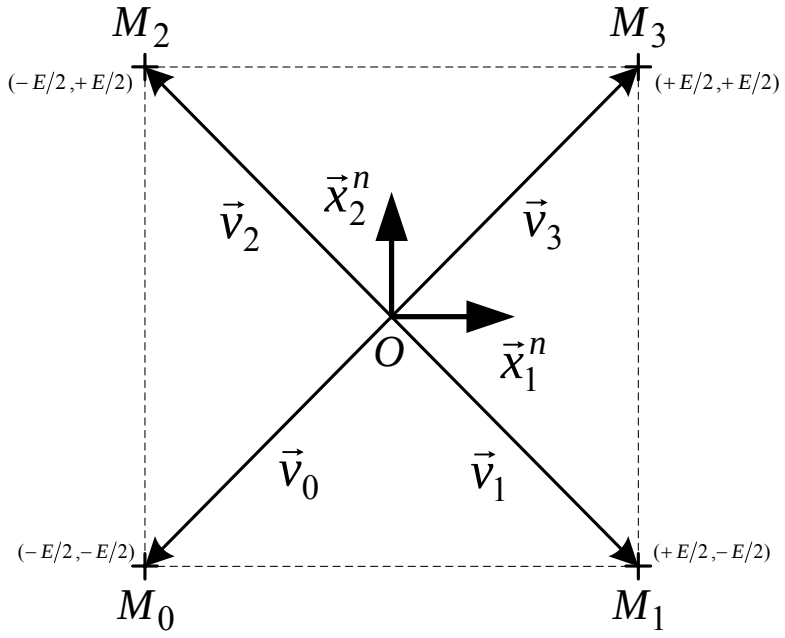


Figure A.3. Représentation vectorielle des tensions issues d'une structure à 2 bras

On trouvera des compléments de cette approche dans [92], [T1]. Cette structure est particulièrement utilisée pour les systèmes polyphasés où chaque phase est alimentée par un « onduleur monophasé » à

deux bras avec néanmoins une contrainte de synchronisation temporelle forte entre ces différents onduleurs monophasés. Dans [92], on utilise cette structure pour étudier l'alimentation en mode dégradé d'une machine triphasée par seulement deux bras.

Structure à trois bras

Le vecteur tension appartient à un espace de dimension 3 et peut prendre 2^3 =8 valeurs. La Figure A.4. donne la représentation vectorielle de l'onduleur à trois bras en respectant les conventions précédemment définies. Néanmoins, pour alléger la figure, seules les extrémités des vecteurs qui définissent les sommets M_k du polyèdre « Cube » sont représentées. Les lignes en pointillés rejoignent toujours les vecteurs qui ne diffèrent que par une seule commutation.

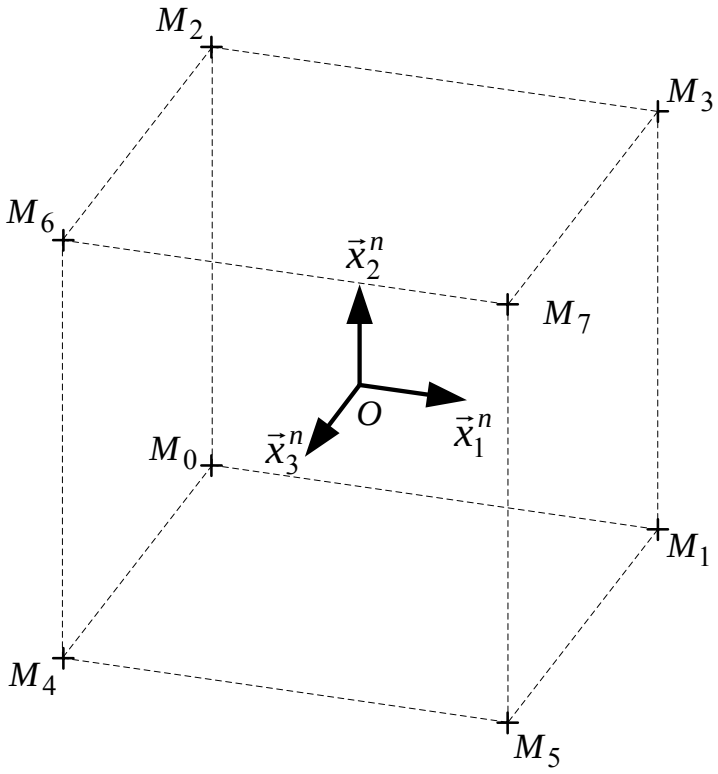


Figure A.4. Représentation des vecteurs tensions caractéristiques d'une structure à 3 bras

Ce type de représentation spatiale d'un onduleur à trois bras est développé avec des variantes dans [109], [137].

Structure à quatre bras

La représentation graphique tridimensionnelle d'un onduleur à quatre bras alimentant une charge triphasée est encore possible si le potentiel de référence n'est plus le point fictif *N* mais une des sorties d'un des quatre bras [168], [100]. Le polyèdre caractéristique de l'onduleur dans l'espace de dimension 4 comporte alors 16 sommets [162], [67] et est appelé Tesseract.

Structure à plus de quatre bras

La représentation graphique de systèmes à plus de quatre dimensions n'est pas possible. La structure géométrique caractéristique de l'onduleur est toujours néanmoins un polyèdre appelé alors hypercube (ou *n*-cube) comportant 2^n sommets. On constatera que vu de la charge cette structure peut être représentée, pour les charges usuelles, en la décomposant dans des sous-espaces vectoriels particuliers de dimension 1 ou 2.

En résumé : l'onduleur de tension à *n*-bras deux niveaux est caractérisé par un hypercube comportant 2^n sommets dans un espace à *n* dimensions.

2. Commande aux valeurs moyennes : Modulation de la Largeur des Impulsions (MLI)

2.1. Définition et expression de la valeur moyenne au sens vectoriel

L'équation [A.3] rappelle tout d'abord la notion de valeur moyenne glissante d'une grandeur *g* sur la période *T*.

$$\langle g(t)\rangle(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} g(\tau)d\tau \qquad [A.3]$$

Si on échantillonne cette valeur tous les instants qT_e, l'équation [A.3] devient :

$$\langle g(t)\rangle(qT_e) = \frac{1}{T_e}\int_{(q-1)T_e}^{qT_e} g(\tau)d\tau \qquad [A.4]$$

En appliquant la définition [A.4] au vecteur tension $\vec{v}$, il vient :

$$\begin{aligned}\langle\vec{v}\rangle(qT_e) &= \frac{1}{T_e}\int_{(q-1)T_e}^{qT_e}\vec{v}\,d\tau = \frac{1}{T_e}\int_{(q-1)T_e}^{qT_e}\left(\sum_{k=1}^{n}v_{kN}(\tau)\vec{x}_k^n\right)d\tau \\ &= \sum_{k=1}^{n}\frac{1}{T_e}\left(\int_{(q-1)T_e}^{qT_e}v_{kN}(\tau)d\tau\right)\vec{x}_k^n = \sum_{k=1}^{n}\langle v_{kN}\rangle(qT_e)\,\vec{x}_k^n\end{aligned} \qquad [A.5]$$

La valeur moyenne du vecteur tension imposé par l'onduleur s'exprime donc simplement en fonction des valeurs moyennes $\langle v_{kN}\rangle$ des tensions v_{kN} .

Cette valeur moyenne vectorielle peut aussi se calculer directement à partir des vecteurs de la famille caractéristique de l'onduleur $\left\{\vec{v}_i / i \in \left\{0,\ldots,2^n-1\right\}\right\}$. En effet, à un instant quelconque le vecteur tension qu'impose l'onduleur à la charge est forcément égal à l'un 2^n des vecteurs $\vec{v}_i$. En définissant par t_i la durée totale d'activation du vecteur $\vec{v}_i$ pendant la période T_e il vient :

$$\langle\vec{v}\rangle(qT_e) = \frac{1}{T_e}\int_{(q-1)T_e}^{qT_e}\vec{v}(\tau)d\tau = \frac{1}{T_e}\sum_{i=0}^{2^n-1}t_i\vec{v}_i = \sum_{i=0}^{2^n-1}\alpha_i\vec{v}_i \qquad [A.6]$$

$\alpha_i = \dfrac{t_i}{T_e}$ est appelé rapport cyclique du vecteur $\vec{v}_i$ pendant la période T_e . On notera alors les propriétés suivantes :

$$\sum_{i=0}^{2^n-1}\alpha_i = 1 \text{ et } 0 \le \alpha_i \le 1 \qquad [A.7]$$

Les relations [A.5] et [A.6] permettent d'établir un lien entre l'ensemble des tensions moyennes $\langle v_{kN}\rangle$ désirées et les durées t_i d'activation des vecteurs $\vec{v}_i$ nécessaires pour les obtenir. Ainsi l'équation [A.6] définit une MLI vectorielle en ce sens que le vecteur « valeur moyenne » désiré $\langle\vec{v}\rangle$ est obtenu par modulation de la durée d'application de vecteurs tension $\vec{v}_i$ qu'est capable de générer l'onduleur.

Par ailleurs, la propriété [A.7] permet d'interpréter par la géométrie la relation [A.6]. En associant un point *M* à l'extrémité du vecteur moyen $\langle\vec{v}\rangle$, [A.6] devient :

$$\overrightarrow{OM} = \sum_{i=0}^{2^n-1}\alpha_i\overrightarrow{OM_i} \qquad [A.8]$$

En géométrie, *M* est appelé barycentre de la famille des 2^n points M_i. Il vient ainsi en utilisant les propriétés élémentaires des barycentres:

- si deux vecteurs sont activés alors l'extrémité du vecteur moyen appartient au segment qui joint les deux extrémités des vecteurs activés;
- si trois vecteurs non colinéaires d'extrémités M_1, M_2, M_3 sont activés alors l'extrémité *M* du vecteur moyen appartient au triangle de sommets M_1, M_2 et M_3;
- si quatre vecteurs non coplanaires non colinéaires d'extrémités M_1, M_2, M_3, M_4 sont activés alors l'extrémité *M* du vecteur moyen appartient au tétraèdre de sommets M_1, M_2, M_3 et M_4.
- etc…

Par abus de langage, on confondra dans la suite du chapitre un vecteur $\overrightarrow{OM}$ et le point *M* associé. Un vecteur pourra ainsi être considéré comme le barycentre d'une famille de vecteurs.

Appliquons sur un exemple les différentes notions introduites précédemment. On s'intéresse, dans le cas d'un onduleur à deux niveaux et deux bras, au calcul d'un vecteur qui ait une valeur moyenne obtenue à partir de seulement deux vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{v}_1$ activés de la façon suivante :

- de 0 à αT_e : $\vec{v} = \vec{v}_0$;
- de αT_e à T_e : $\vec{v} = \vec{v}_1$

avec ($0 \le \alpha \le 1$).

En appliquant la définition de la valeur moyenne, il vient :

$$\begin{aligned}\langle \vec{v} \rangle &= \frac{1}{T_e}\int_0^{T_e} \vec{v}(\tau)d\tau = \frac{1}{T_e}\left(\int_0^{\alpha T_e} \vec{v}_0(\tau)d\tau + \int_{\alpha T_e}^{T_e} \vec{v}_1(\tau)d\tau\right) \\ &= \frac{1}{T_e}\left(\vec{v}_0\int_0^{\alpha T_e} d\tau + \vec{v}_1\int_{\alpha T_e}^{T_e} d\tau\right) = \alpha\,\vec{v}_0 + (1-\alpha)\vec{v}_1\end{aligned} \qquad \text{[A.9]}$$

En considérant l'expression des vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{v}_1$ (voir [A.2]) l'expression [A.9] devient :

$$\vec{v} = -\frac{E}{2}(2\alpha - 1)\vec{x}_1^n - \frac{E}{2}\vec{x}_2^n \qquad \text{[A.10]}$$

L'examen de la Figure A.5. montre que l'on obtient bien les valeurs moyennes des tensions v_{1N} et v_{2N} données par [A.5]. Ce résultat peut facilement être retrouvé géométriquement sur la Figure A.6. En

effet, dans cet exemple seuls les points M_0 et M_1 sont activés. L'extrémité M du vecteur moyen, combinaison barycentrique de ces points, se situera donc sur le segment de droite les réunissant (matérialisé en gris). Il apparaît de suite par projection de $\langle \vec{v} \rangle$ sur les vecteurs $\vec{x}_1^n$ et $\vec{x}_2^n$ que la tension moyenne $\langle v_{1N} \rangle$ peut varier de *–E/2* à *E/2* alors que $\langle v_{2N} \rangle$ ne peut être qu'égale à $-E/2$.

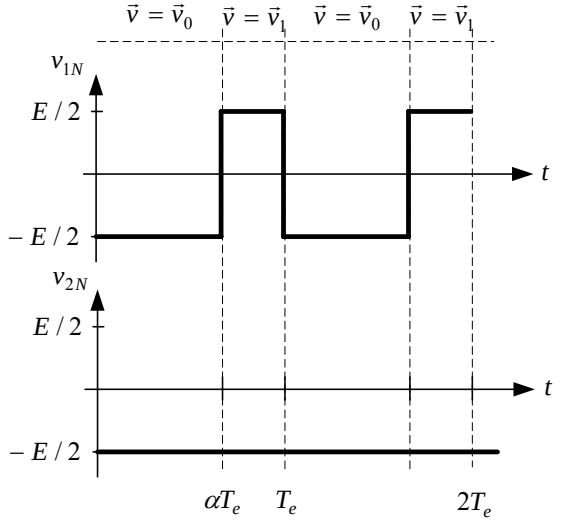


Figure A.5. Chronogramme des tensions issues d'une MLI vectorielle

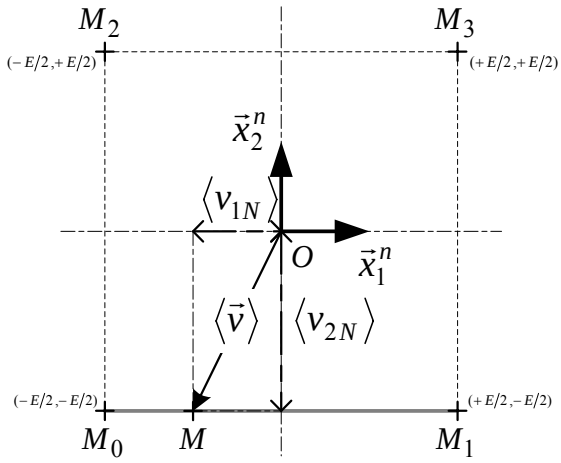


Figure A.6. Représentation graphique d'une MLI vectorielle – Activation de 2 vecteurs

Il est à noter que dans cet exemple chaque vecteur n'est activé qu'une seule fois pendant la période T_e. Il est possible bien entendu d'activer plusieurs fois le même vecteur tout en ayant la même durée totale t_k pour chaque vecteur $\vec{v}_k$ mais le nombre de commutations augmente alors.

Si on active à présent dans une même période les vecteurs $\vec{v}_0$, $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_3$ alors la surface engendrée est un triangle (matérialisé en gris sur la Figure A.7.) et les tensions $\langle v_{1N} \rangle$ et $\langle v_{2N} \rangle$ peuvent varier de *–E/2* à *E/2* mais avec $\langle v_{1N} \rangle \leq \langle v_{2N} \rangle$ puisque le triangle se situe en dessous de la droite d'équation $\langle v_{1N} \rangle = \langle v_{2N} \rangle$.

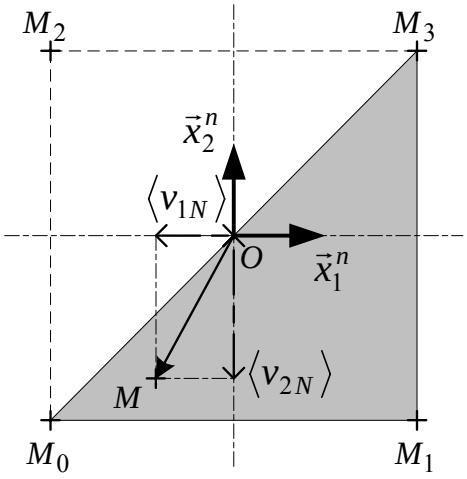


Figure 4.7. Représentation graphique d'une MLI vectorielle– Activation de 3 vecteurs

De façon générale, il est possible par une commande aux valeurs moyennes d'atteindre tout vecteur moyen désiré dont l'extrémité se situe à l'intérieur de l'hypercube défini par les 2^n sommets M_i associés aux 2^n vecteurs $\vec{v}_i$ caractérisant l'onduleur.

En résumé : au sens de la commande aux valeurs moyennes, l'onduleur de tension est donc caractérisé par l'hyper-volume de l'hypercube dont les 2^n sommets caractérisent l'onduleur en valeur instantanée.

2.2. Recherche d'un nombre minimum de vecteurs à activer: notion de famille

Au paragraphe précédent, les formules [A.6] et [A.7] ont permis de caractériser géométriquement par un hypercube à 2^n sommets, un onduleur commandé aux valeurs moyennes.

Considérant un vecteur moyen désiré $\langle \vec{v} \rangle$ appartenant à cet hypercube, il s'agit à présent de rechercher et d'examiner, en s'appuyant sur la caractérisation vectorielle proposée, les solutions au problème de la détermination des vecteurs à activer et des durées d'activation correspondantes.

On rappelle à cet effet les propriétés mathématiques suivantes :

- *P1 :* dans un espace de dimension *n*, une famille de *n+1* points $\{M_i / i \in \{0,\dots,n\}\}$ (ou de vecteurs $\vec{v}_i$) constitue un repère barycentrique si la famille des *n* vecteurs $\left\{\overrightarrow{M_0 M_i} / i \in \{1,\dots,n\}\right\}$ ou $\{\vec{v}_i - \vec{v}_0 / i \in \{1,\dots,n\}\}$ est une base.

- *P2* : les *n+1* coordonnées barycentriques d'un point *M* dans un repère barycentrique existent, sont uniques et leur somme est égale à 1.

Or, on a vu que les relations [A.6] et [A.7] permettent d'interpréter un vecteur moyen désiré $\langle \vec{v} \rangle$ comme une combinaison barycentrique des 2^n vecteurs caractérisant l'onduleur de tension. Comme $2^n > n+1$, on en déduit avec *P2* qu'il n'est pas nécessaire d'activer tous les 2^n vecteurs caractéristiques de l'onduleur pour obtenir le vecteur désiré et qu'il y a toujours une solution où seulement *n+1* vecteurs sont activés pendant la période T_e. Ce point est intéressant dans la mesure où le nombre de commutations d'interrupteurs qui ont lieu dans cette période T_e est au minimum égal au nombre de vecteurs activés dans cette même période. Par conséquent, dans une démarche d'optimisation de la commande de l'onduleur, il est opportun de déterminer au préalable des familles de *n+1* vecteurs sur lesquelles il sera possible de réaliser, pour tout vecteur de l'hypercube, une décomposition barycentrique de façon unique. La propriété *P1* permet de trouver des familles : pratiquement la nullité ou non d'un déterminant d'ordre *n* permet de vérifier si une famille de *n+1* vecteurs $\vec{v}_i$ vérifie ou non la propriété désirée *P1*.

En résumé : tout vecteur moyen $\langle \vec{v} \rangle$ à l'intérieur de l'hypercube caractéristique de l'onduleur peut être obtenu en activant un ensemble de *n+1* vecteurs judicieusement choisis. Les durées d'activation ne sont autres que les coordonnées barycentriques du point extrémité.

A ce niveau il est important de préciser qu'il n'est pas pour autant toujours nécessaire d'activer *n+1* vecteurs. Si le vecteur désiré appartient à un sous-espace engendré par *K* vecteurs $\vec{v}_i$ alors il suffira d'activer seulement ces *K* vecteurs.

Prenons quelques exemples. Si le vecteur appartient :

- au segment qui joint deux vecteurs $\vec{v}_i$ alors il suffira d'activer seulement deux vecteurs pour l'obtenir (voir exemple Figure A.6.) ;
- au triangle délimité par trois vecteurs $\vec{v}_i$, il suffira d'utiliser ces trois vecteurs (voir Figure A.7.);
- au tétraèdre délimité par quatre vecteurs $\vec{v}_i$, il suffira d'utiliser ces quatre vecteurs (voir Figure A.9.).

Ainsi, dans le cadre de l'onduleur à trois bras, la famille des commandes en MLI dites « Flat-top » ou discontinue (Discontinuous PWM dans [76]) n'utilise toujours que trois vecteurs au lieu de quatre pour la commande classique aux phaseurs complexes. Les vecteurs moyens désirés appartiennent tous à la surface du cube qui caractérise l'onduleur de tension à trois bras [T1]. Ces commandes sont connues pour minimiser le nombre de commutations et ainsi réduire les pertes à la commutation jusqu'à 50% par rapport à une commande classique [20][76].

A ce stade de l'étude, il apparaît qu'il existe des familles de vecteurs avec lesquelles il est intéressant de travailler. Les conditions que doivent vérifier ces familles ont été spécifiées (famille libre avec calcul associé de la non-nullité d'un déterminant). Néanmoins les familles solutions n'ont pas été explicitées.

On présente ci-dessous un ensemble de familles particulièrement utilisé dans la pratique (MLI intersective centrée et commande vectorielle classique), mais il en existe d'autres. Cet ensemble est obtenu par la technique d'arbre suivante (voir Figure A.8.) :

- le premier point de chaque famille est le point M_0 ;
- le deuxième point M_k est obtenu en modifiant la valeur d'une seule fonction de connexion s_i intervenant dans l'expression [A.2] : on obtient ainsi n points de bifurcation ;
- à partir de chaque point M_k précédent on réitère une nouvelle modification d'une seule fonction de connexion parmi celles qui n'ont pas encore été modifiées. A ce niveau, on en dénombre *n-1* pour chaque point M_k ;
- on poursuit ainsi la démarche jusqu'au point de chaque branche où toutes les fonctions de connexions auront été changées une seule fois. Il existe ainsi pour chaque branche de l'arbre *n-1* bifurcations.

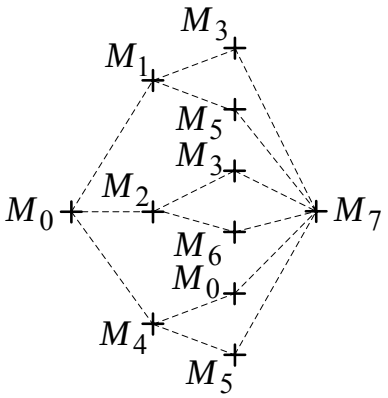


Figure A.8. : Graphe d'obtention d'un ensemble de n! familles dans le cas où n=3

Cette technique permet donc de définir un groupe de *n!* hyper-volumes V_d associés à *n!* familles dont l'union couvre complètement sans recouvrement l'hypercube caractéristique de l'onduleur. Tout point *M* qui ne situe pas à la frontière entre deux hyper-volumes appartient à un et un seul hyper-volume V_d. Le mode d'élaboration du groupe de familles décrit précédemment permet de déterminer aisément par *n* tris, le volume V_d auquel le point *M* appartient. Ces tests pourront s'opérer de façon soit implicite (commande intersective avec des triangles [20]) soit explicite par algorithme. Il est à noter qu'une variante de l'approche proposée ci-dessous est développée dans [CI8], [R9]. La variante consiste à calculer des coordonnées dans une des *n!* familles décrite Figure A.8. Si les coordonnées sont positives cela signifie que le point *M* appartient au volume engendré par la famille. Si ce n'est pas le cas, l'interprétation des *n* signes permet de trouver par un simple algorithme le volume V_d auquel appartient le point ainsi que les rapports cycliques associés.

En résumé : il est possible de définir des familles de vecteurs avec lesquelles il est intéressant de travailler pour l'élaboration de la commande aux valeurs moyennes. Des critères à respecter ainsi qu'un exemple de familles ont été donnés.

Note : s'il est possible lorsque le nombre de bras de l'onduleur est réduit d'explorer systématiquement toutes les possibilités de commande des interrupteurs, cette démarche devient vite impossible lorsque le nombre de bras augmente (ou le nombre de niveaux). De ce fait, il devient nécessaire de formaliser les résultats obtenus pour $n<4$ par des méthodes générales.

2.3. Calcul des durées d'activation

On se placera dans le cadre des résultats du paragraphe précédent à savoir que l'on considère une famille de *n+1* vecteurs vérifiant la propriété *P2* définie au paragraphe 2.2. Le calcul des durées d'activation des vecteurs sélectionnés se réduit à la résolution d'un système à *n+1* équations et *n+1* inconnues.

Considérons par exemple un vecteur valeur moyenne $\langle \vec{v} \rangle$ évoluant dans un espace à trois dimensions :

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle v_{1N} \rangle \vec{x}_1^n + \langle v_{2N} \rangle \vec{x}_2^n + \langle v_{3N} \rangle \vec{x}_3^n \qquad [A.11]$$

On choisit de générer $\langle \vec{v} \rangle$ à partir des quatre vecteurs suivants :

$$\vec{v}_0 = -\frac{E}{2}\vec{x}_1^n - \frac{E}{2}\vec{x}_2^n - \frac{E}{2}\vec{x}_3^n \quad \vec{v}_1 = +\frac{E}{2}\vec{x}_1^n - \frac{E}{2}\vec{x}_2^n - \frac{E}{2}\vec{x}_3^n$$

$$\vec{v}_3 = +\frac{E}{2}\vec{x}_1^n + \frac{E}{2}\vec{x}_2^n - \frac{E}{2}\vec{x}_3^n \quad \vec{v}_7 = +\frac{E}{2}\vec{x}_1^n + \frac{E}{2}\vec{x}_2^n + \frac{E}{2}\vec{x}_3^n$$

C'est-à-dire que $\langle \vec{v} \rangle$ respecte la condition [A.12] :

$$\begin{cases} \langle \vec{v} \rangle = \alpha_0\vec{v}_0 + \alpha_1\vec{v}_1 + \alpha_3\vec{v}_3 + \alpha_7\vec{v}_7 \\ \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_7 = 1 \end{cases} \qquad \text{[A.12]}$$

On obtient le système de 4 équations en projetant les expressions [A.11] et [A.12] de $\langle \vec{v} \rangle$ suivant les trois dimensions. Ainsi pour la première coordonnée on a :

$$\langle \vec{v} \rangle . \vec{x}_1^n = \left(\langle v_{1N} \rangle \vec{x}_1^n + \langle v_{2N} \rangle \vec{x}_2^n + \langle v_{3N} \rangle \vec{x}_3^n \right) . \vec{x}_1^n = \langle v_{1N} \rangle$$

$$\langle \vec{v} \rangle . \vec{x}_1^n = \left(\alpha_0\vec{v}_0 + \alpha_1\vec{v}_1 + \alpha_3\vec{v}_3 + \alpha_7\vec{v}_7 \right) . \vec{x}_1^n = \frac{E}{2}\left(-\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_7 \right)$$

Globalement on obtient le système d'équations :

$$\begin{cases} -\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_7 = \frac{2}{E}\langle v_{1N} \rangle \\ -\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_7 = \frac{2}{E}\langle v_{2N} \rangle \\ -\alpha_0 - \alpha_1 - \alpha_3 + \alpha_7 = \frac{2}{E}\langle v_{3N} \rangle \\ \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_7 = 1 \end{cases} \text{ avec } Det = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = -8$$

Le fait que la famille de vecteurs considérée vérifie la propriété *P1* définie au paragraphe 4.2.2.2., assure que le déterminant caractéristique de l'équation *Det* est non nul.

En appliquant la règle de Cramer, on obtient les solutions :

$$\alpha_0 = \frac{1}{Det}\begin{vmatrix} \frac{< v_{1N} >}{E/2} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{< v_{2N} >}{E/2} & -1 & 1 & 1 \\ \frac{< v_{3N} >}{E/2} & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad \alpha_1 = \frac{1}{Det}\begin{vmatrix} -1 & \frac{< v_{1N} >}{E/2} & 1 & 1 \\ -1 & \frac{< v_{2N} >}{E/2} & 1 & 1 \\ -1 & \frac{< v_{3N} >}{E/2} & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad \alpha_3 = \frac{1}{Det}\begin{vmatrix} -1 & 1 & \frac{< v_{1N} >}{E/2} & 1 \\ -1 & -1 & \frac{< v_{2N} >}{E/2} & 1 \\ -1 & -1 & \frac{< v_{3N} >}{E/2} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\alpha_7 = \frac{1}{Det}\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 & \frac{< v_{1N} >}{E/2} \\ -1 & -1 & 1 & \frac{< v_{2N} >}{E/2} \\ -1 & -1 & -1 & \frac{< v_{3N} >}{E/2} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

En Figure A.9. on trouvera une représentation graphique de la solution de l'équation [A.12]. Le vecteur $\langle \bar{v} \rangle$ est représenté par une somme vectorielle exprimée par deux formulations : l'une définie par [A.11], l'autre, barycentrique, par [A.12] avec les valeurs des rapports cycliques obtenus par résolution de l'équation.

Dans cet exemple, le vecteur à générer, matérialisé par son point extrémité *M* a pour coordonnées :

$$\langle v_{1N} \rangle = E/3 \quad \langle v_{2N} \rangle = E/10 \quad \langle v_{3N} \rangle = -E/6$$

Après calcul des solutions par la méthode proposée on obtient :

$$\alpha_0 = 0{,}167 \quad \alpha_1 = 0{,}233 \quad \alpha_3 = 0{,}267 \quad \alpha_7 = 0{,}333$$

On montre dans [20], [T1], [222]] que ces solutions peuvent aussi être obtenues implicitement par l'intersection des trois références $\langle v_{1N} \rangle$, $\langle v_{2N} \rangle$ et $\langle v_{3N} \rangle$, constantes sur la période T_e, avec des signaux triangulaires classiquement utilisés pour l'implantation de la MLI soit en technique analogique soit en technique numérique avec des compteurs/décompteurs. L'intérêt d'un calcul explicite comme celui présenté est qu'il permet de déterminer s'il y a des effets de saturation. On peut alors trouver des rapports cycliques non physiques supérieurs à 1, négatifs ou dont la somme est supérieure à 1. C'est bien alors dans ce cas une approche vectorielle qui permet de prendre en compte ce type de limitation [26].

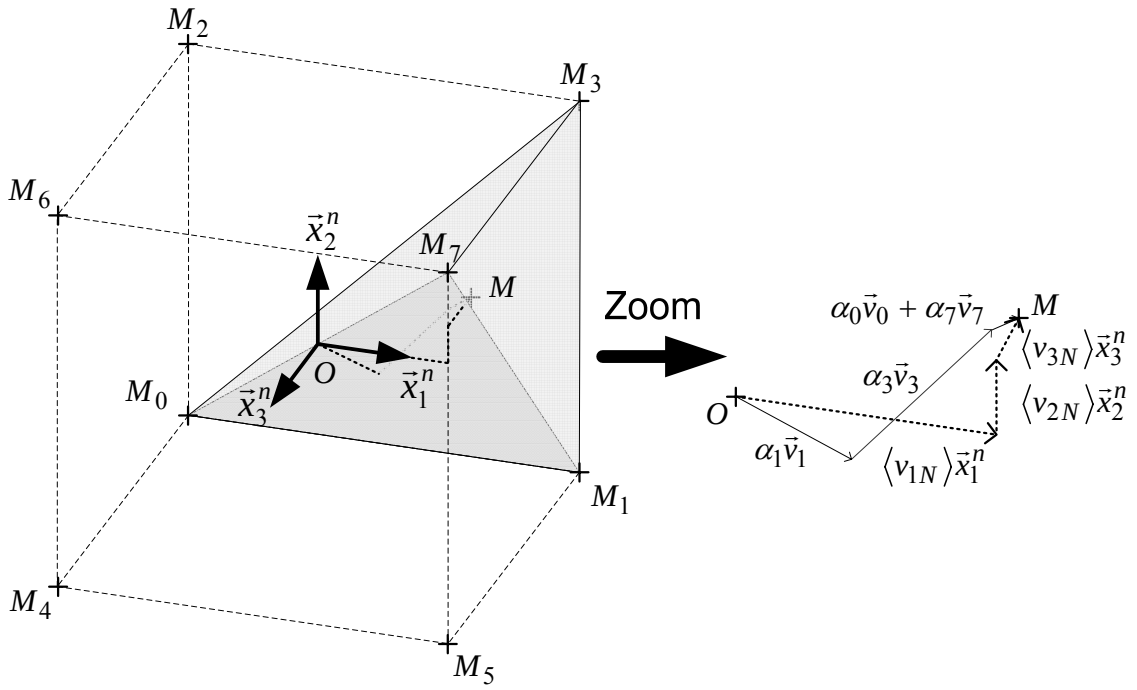


Figure A.9. Représentation graphique d'une MLI vectorielle– Activation de 4 vecteurs

La démarche présentée pour le cas n=3, où une représentation graphique est aisée, se généralise facilement à un espace de dimension *n* ([R9], [CI1]). On devra simplement calculer des déterminants d'ordre n dont n-1 colonnes sont des constantes.

2.4. Séquencement temporel

Une fois que l'on a déterminé les vecteurs qui seront activés pendant une période il reste à définir la séquence de leur activation. Ce séquencement n'a aucun effet sur la valeur moyenne. Par contre, le contenu spectral des tensions générées ainsi que les pertes par commutation des interrupteurs en seront affectés [121]. Selon les contraintes on peut privilégier un des deux aspects (voir commandes avec deux bras d'onduleurs). Les commandes classiques de type MLI intersective centrée impliquent ainsi que deux vecteurs consécutifs activés ne diffèrent que par une seule commutation.

Eléments de synthèse sur les travaux de Franck Scuiller

Dans le cadre de l'activité de publications, Franck Scuiller a étudié différentes structures de machines polyphasées. L'approche a consisté en général à réaliser des comparaisons entre machines soit pour montrer l'intérêt de passer d'une structure triphasée à une structure polyphasée, soit pour faire évoluer une machine polyphasée afin de lui conférer de meilleures caractéristiques.

1. Amélioration des performances d'une machine en changeant le nombre de phases

Dans le principe, l'idée de ce type de comparaison est de considérer une machine triphasée caractérisée par sa géométrie, ses aimants rotoriques, son bobinage statorique. Ensuite on suppose apporter des modifications qui ne modifient pas fortement la quantité de matière mise en jeu mais qui peuvent amener un changement qualitatif (qualité du couple) si on met à profit certaines commandes autorisées par les machines polyphasées. On prendra quelques exemples issus d'articles de congrès.

1.1 Amélioration des caractéristiques d'un petit moteur d'hélice à structure POD (nacelle sous la coque intégrant moteur entrainant directement l'hélice) en passant de trois à cinq phases [CN6].

A partir d'une structure triphasée à aimants permanents (Figure 38), seul le bobinage a été repensé (Figure 40) et différents types d'alimentation ont été considérés (Figure 41) en s'intéressant au couple produit. On tirera les conclusions suivantes sur cet exemple :

- augmentation de 11% du couple nominal (meilleure exploitation des aimants et bobinage plus performant permettant de mettre à profit l'harmonique de rang 3) avec un couple pulsatoire d'amplitude comparable (un petit peu plus faible) mais de fréquence plus élevée (harmonique de rang 10 au lieu de rang 6 en triphasé) ;
- quasi annulation du couple pulsatoire (-94%) si une alimentation sinusoidale est choisie en triphasée et en pentaphasée. L'augmentation du couple n'est plus alors que de 2% (insignifiant)

Il apparaît donc que si l'on veut plus de puissance ce sera possible mais avec sensiblement le même niveau de vibrations et que si l'on veut moins de vibration c'est également possible mais alors sans augmentation de puissance. Différentes stratégies de commande apparaissent. Pour un sous marin ou un navire océanographique il pourra être intéressant d'utiliser tantôt une stratégie tantôt une autre. Il est à noter qu'il est possible aussi théoriquement de réduire les pulsations de couple en triphasé par une alimentation spéciale en courant en utilisant des consignes tabulées alors que dans

le cas polyphasé, c'est simplement une commande vectoriel utilisant une référence sinusoidale par machine fictive qui aboutira à ce résultat.

Vitesse	$\Omega = 500\,tr/min$
Couple	$T_0 = 60\,Nm$
Nombre d'encoches	$N_s = 60$
Nombre de pôles	$N_p = 14$
Type Rotor	Interne
Longueur effective	$L_m = 350\,mm$
Epaisseur Culasse Stator	$e_{cs} = 6\,mm$
Diamètre Statorique	$D = 180\,mm$
Entrefer Mécanique	$e = 1\,mm$
Epaisseur Couche d'Aimant	$e_a = 6\,mm$
Aimantation	$B_r = 1.1\,T$
Proportion d'aimants	$\beta = 0.8$
Epaisseur Culasse Rotor	$e_{cr} = 6\,mm$
Largeur d'encoche	$\delta_s = 0.5\tau_s$
Ouverture d'encoche	$\epsilon_s = 0.5\delta_s$
Epaisseur de bec d'encoche	$b_s = 1\,mm$
Profondeur d'encoche	$p_s = 10\,mm$
Volume d'aimants	$V_a = 132\,dm^3$
Volume de conducteur actif	$V_{cd} = 500\,cm^3$

Figure 38: caractéristiques du propulseur étudié, extrait de [CN6]

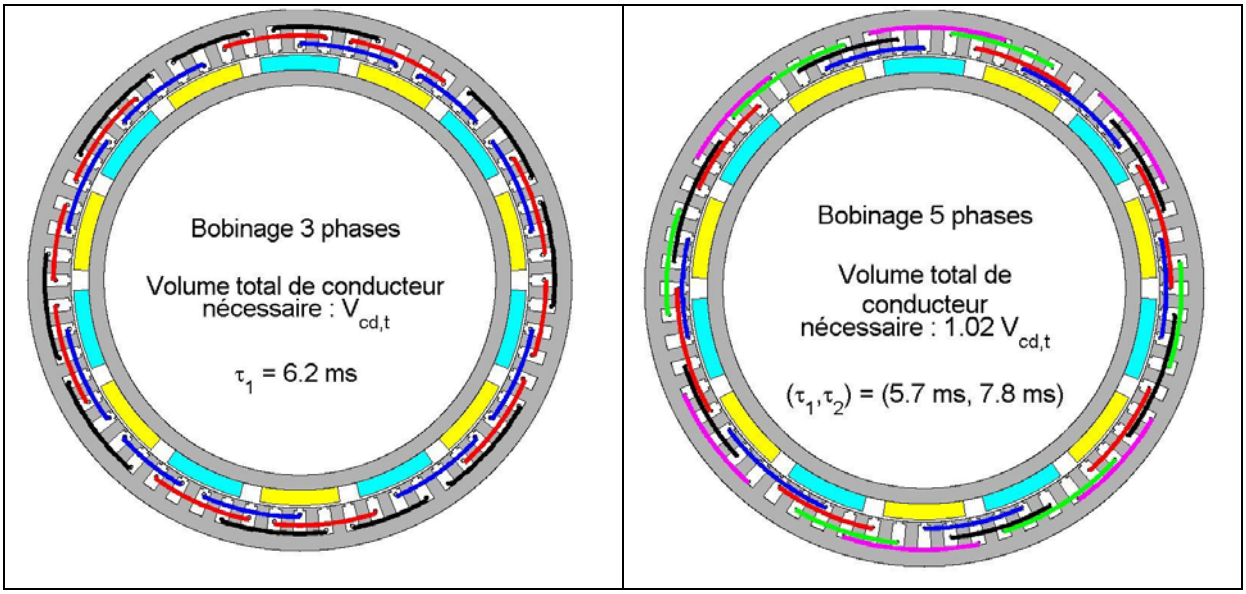
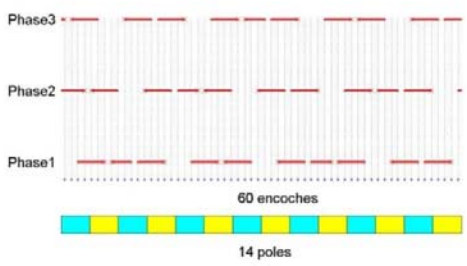
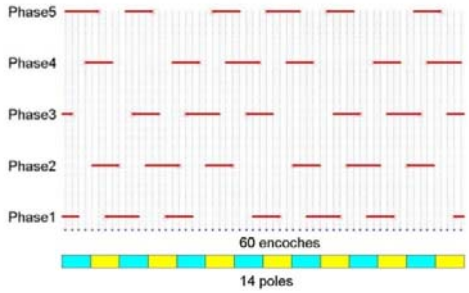


Figure 39: comparaison des deux bobinages étudiés et des constantes de temps associées, extrait de [CN6]

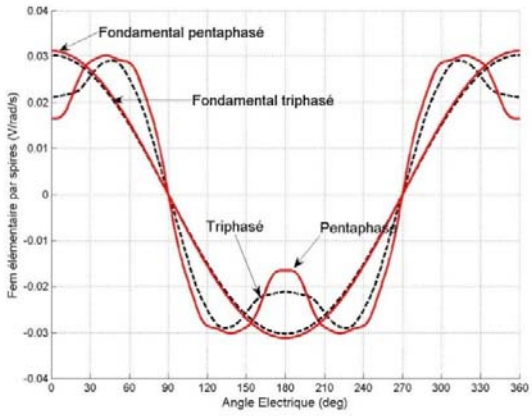


(a) représentation du bobinage triphasé : 8 bobines de pas 4 et de deux bobines de pas 3

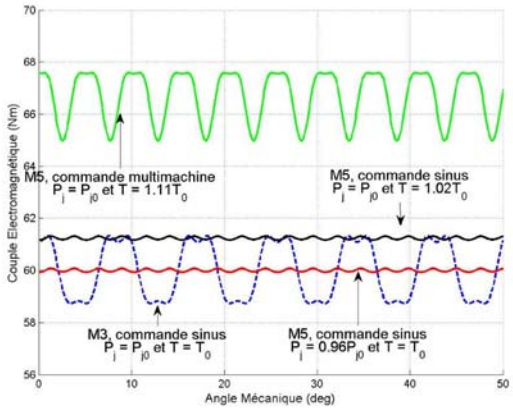


(b) représentation du bobinage pentaphasé : 4 bobines de pas 4 et 2 bobines de pas 5

Figure 40: Comparaison des distributions de bobinage triphasé et pentaphasé, extrait de [CN7]



(a)



(b)

Figure 41: Comparaison des fores électromotrices (a) ainsi que des couples électromagnétiques obtenus par spire des deux bobinages, extrait de [CN7]

TAB. 4 – Performances comparées des deux bobinages ($P_{j0} = 40.0\,W$, $T_0 = 60\,Nm$ et $v_0 = 2.6\,Nm$)

Bobinage	Alimentation	Perte Joule	Couple moyen	Ondulation de couple
Triphasé	Sinusoïdale	P_{j0}	T_0	v_0
Pentaphasé	Sinusoïdale	$0.96\,P_{j0}$	T_0	$0.06\,v_0$
Pentaphasé	Sinusoïdale	P_{j0}	$1.02\,T_0$	$0.06\,v_0$
Pentaphasé	Multimachine	P_{j0}	$1.11\,T_0$	$1.00\,v_0$

Figure 42: extrait de [CN7]

1.2 Amélioration des caractéristiques d'un moteur triphasé à bobinage à pas fractionnaire [CI20] en passant à une machine à 7 phases

Toujours en considérant un moteur triphasé de référence avec bobinage concentré (autour d'une dent) et à pas fractionnaire, une modification du nombre de pôles permet de choisir un bobinage permettant d'améliorer les caractéristiques de l'entraînement à 7 phases à savoir une augmentation de 7% du couple moyen (ou une diminution de 12% des pertes Joule à couple moyen donné) avec suppression quasi-complète du couple pulsatoire.

Bien sûr on peut penser que ce gain se paie en termes d'électronique de puissance mais cela n'est pas toujours si évident. Par exemple, pour les applications basse tension où il est nécessaire en triphasé de mettre en parallèle plusieurs interrupteurs par phase, la solution proposée permettra également en général d'utiliser un seul interrupteur par phase…avec qui plus est une possibilité de fonctionner en mode dégradé.

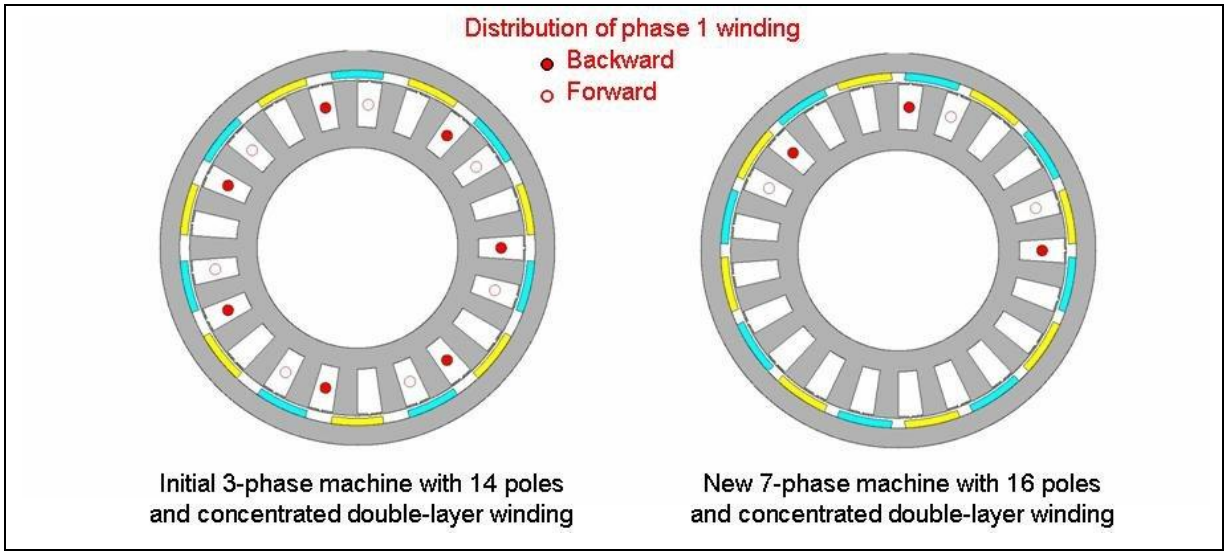


Figure 43: représentation des bobinages d'une phase, extrait de [CI20]

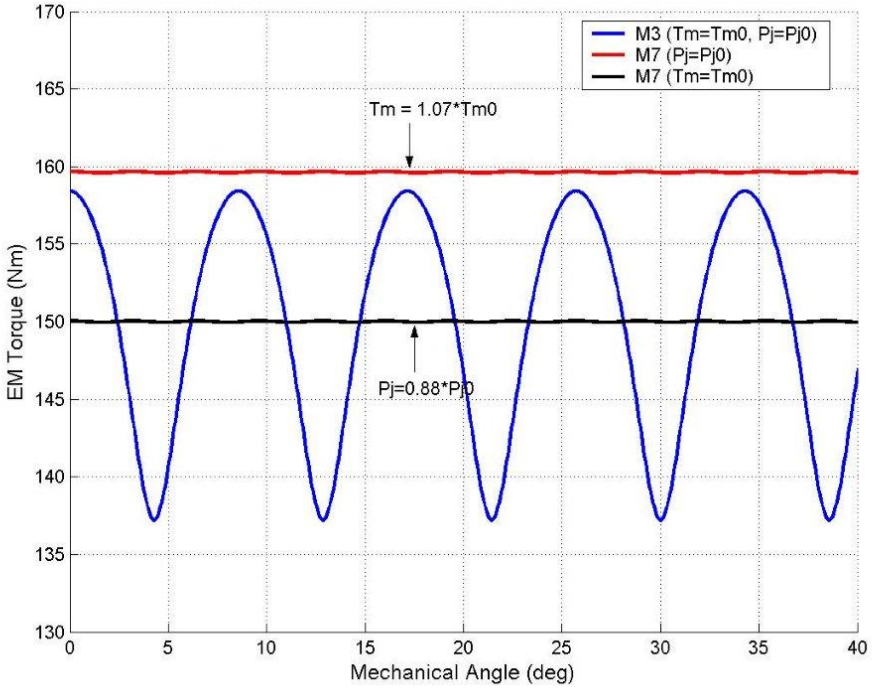


Figure 44: comparaison des couples de la machine à 7 phases avec le couple de la machine triphasée selon différentes commandes, extrait de [CI20]

Table 2: Main Geometrical Parameters of the Motor

Slot Number	*21*
Slot Depth	*27 mm*
Slot Opening	*13%*
Angular Teeth Width	*8,6 degrees*
Stator Core Thickness	*12,7 mm*
Mechanical Airgap	*1,5 mm*
Axial Effective Length	*65 mm*
Magnet Thickness	*4,5 mm*
Magnet Arc on Pole Pitch	*0,67*
Magnet Magnetization	*1,0 T*
Magnet Volume	*180,6 cm3*
External Diameter	*240 mm*
Torque	*150 Nm*
Speed	*2000 rpm*

Table 3: Parameters that result from the winding

Machine	Reference	New
Phase Number	3	7
Pole Number	14	16
Slot per pole and phase	0,5	0,19
Number of turns per phase	57	25
Slot Fill Factor	0,74	0,74
Fundamental winding factor	0,87	0,92
Stator Resistance (mOhm)	27	12

Figure 45: extrait de [CI20]

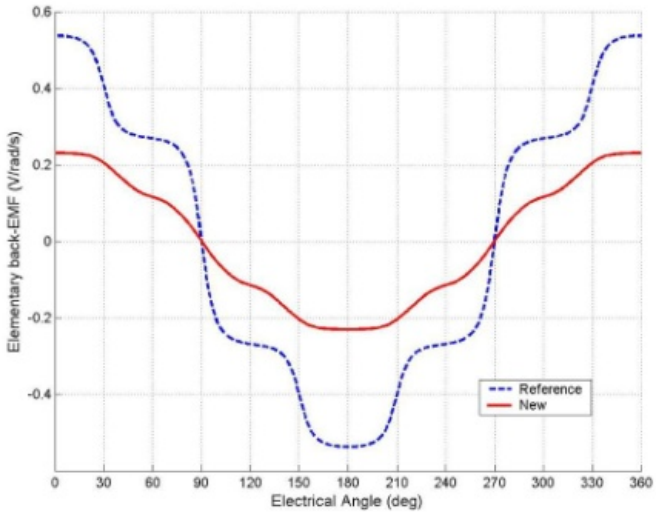


Figure 46: forces électromotrices pour les deux machines, extrait de [CI20]

1.3 Amélioration des caractéristiques d'un moteur de propulsion triphasé à bobinage à pas fractionnaire [CI22]

En partant d'un moteur de propulsion de 2,1 MW/105 tr/min comportant en parallèle six structures triphasées à bobinage à pas fractionnaire de type 36 encoches/10 pôles, le papier proposait le passage à une structure double étoile pentaphasée comportant 80 encoches au lieu de 216 tout en conservant une capacité à fonctionner en mode dégradé et un découplage magnétique entre les deux étoiles. Le couple pulsatoire était alors encore réduit en passant de 2-3% à 0,6%. Par contre, apparaissait une dégradation du facteur de puissance (de 0,9 à 0,75) dans le cadre d'une alimentation purement sinusoidale. Il est important de rappeler en effet que, même si l'utilisation de la machine secondaire n'apporte pas forcément un gain de couple extraordinaire, son utilisation permet aussi de mieux utiliser la source de tension (forme de la tension plus rectangulaire). C'est la combinaison de ces deux effets qui permet d'offrir un avantage plus significatif.

2. Amélioration des performances d'une machine polyphasée en changeant l'aimantation et/ou le bobinage

Dans les années 2000, la plupart des machines synchrones à aimants permanents polyphasées étudiées étaient de structure simple tant au niveau des aimants que des bobinages. Ainsi le prototype développée dans la thèse de Xavier Kestelyn était à aimants déposés en surface sans espace interpolaire et à bobinage diamétral concentré (1 encoche par pole et par phase). Afin d'améliorer les

caractéristiques de ces machines il est possible de modifier la topologie de l'aimantation rotorique et/ou le bobinage : on peut agir sur les caractéristiques spectrales du champ magnétique créé par les aimants ainsi que sur le filtre que constitue le bobinage.

2.1 Action sur les seuls aimants [R10]

A partir d'une machine synchrone pentaphasée à bobinage diamétral concentré à aimants déposés sans espace interpolaire, une structure rappelant les structures de Hallbach est proposée. On s'impose une structure simple et l'optimisation s'opère en cherchant à augmenter l'harmonique de rang trois au sein de la force électromotrice. Il apparait une diminution de 20% des pertes Joule et une diminution par 3 de l'amplitude des pulsations de couple.

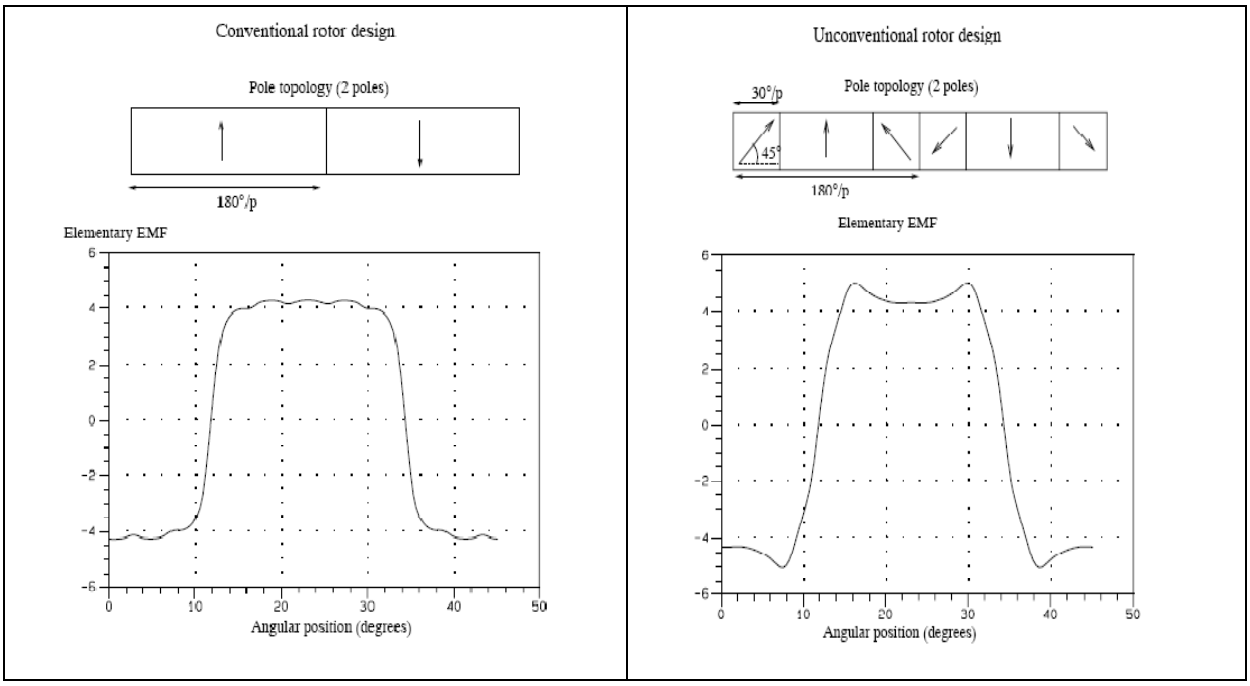


Figure 47: extrait de [R10]

Tableau 9: comparaison à couple moyen donné à partir de [R10]

Type de rotor	Type d'alimentation	Pertes Joule	Pulsation de couple	Valeur RMS du premier harmonique de courant	Valeur RMS du premier harmonique de courant
Moteur référent	H1 seul	P_J	7,1%	3,25A	0A
Moteur référent	H1 et H3	93% P_J	9,3%	3,01A	0,84A
Moteur amélioré	H1 et H3	80% P_J	2%	2,76A	0,88A

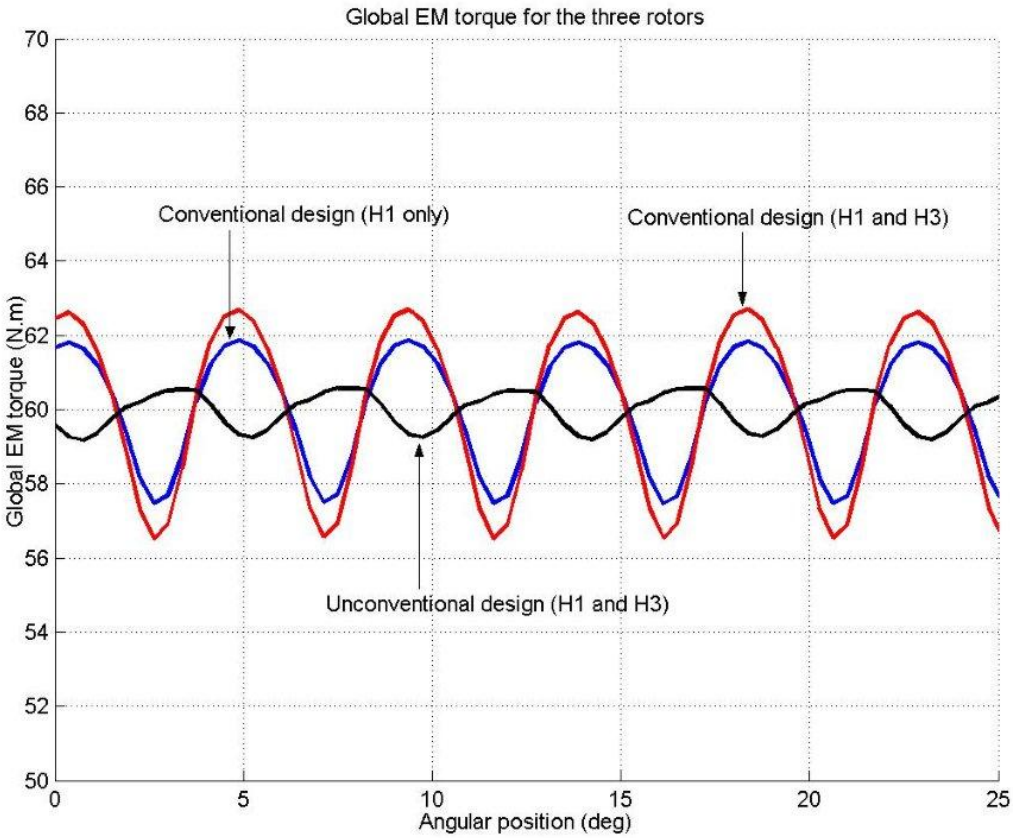


Figure 48: comparaison des couples de la machine triphasé et de la machine pentaphasée pour différentes stratégies de commande (Sinus pur H1 ou bi-harmonique H1 et H3), extrait de [R10]

2.2. Action sur le bobinage [CI27]

Tout en conservant la même structure pour les aimants mais en passant de 16 à 14 pôles, l'utilisation d'un bobinage à pas fractionnaire en lieu et place d'un bobinage à pas diamétral concentré permet de réaliser un filtrage afin de vérifier la caractéristique idéale (pour une commande simple mais performante), à savoir un harmonique par machine fictive. Par ailleurs, la vérification de cette contrainte permet également d'obtenir des inductances cycliques de même ordre de grandeur pour toutes les machines fictives. Cette propriété permet de réduire la fréquence de MLI en réduisant les courants parasites liés aux machines fictives dont les constantes de temps sont très faibles dans le cas du bobinage à pas diamétral.

Tableau 10: extrait de [CI27]

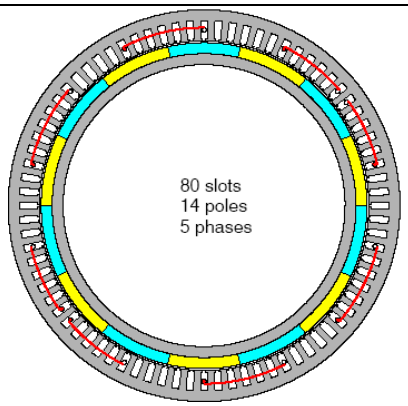


Figure 49: bobinage à pas fractionnaire de la machine à 7 phases

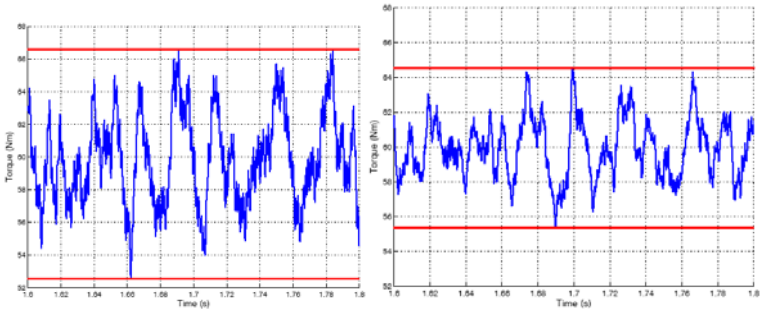


Figure 50: comparaison des couples

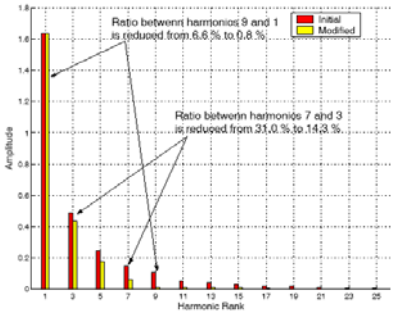


Figure 51: comparaison des spectres des forces électromotrices (modification forte des ratios H9/H1 et H7/H3)

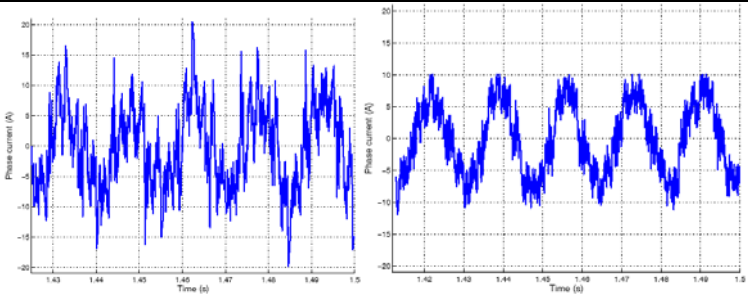


Figure 52: comparaison des courants dans le cadre d'une commande MLI de même fréquence de porteuse

2.3. Action simultané sur le bobinage et les aimants [R15]

Par action, et sur le bobinage et sur les aimants, il a été mis en évidence sur un exemple de machine pentaphasée un gain de 15% au niveau du couple avec une réduction de 30% de l'amplitude des ondulations de couples (Tableau 11 et Figure 53 à Figure 57).

Tableau 11: extrait de 26[R15]

Table 3: Numerical results concerning the torque improvement

Machine	Magnet layer	Supply	Avg torque	Torque ondulation
3-phase	Conventional	sinus	T_0	v_0
3 phase	Optimised	sinus	$1.06\,T_0$	$0.95\,v_0$
5-phase	Conventional	sinus	$1.05\,T_0$	$0.64\,v_0$
5-phase	Optimised	sinus	$1.11\,T_0$	$0.02\,v_0$
5-phase	Optimised	MM	$1.15\,T_0$	$0.29\,v_0$

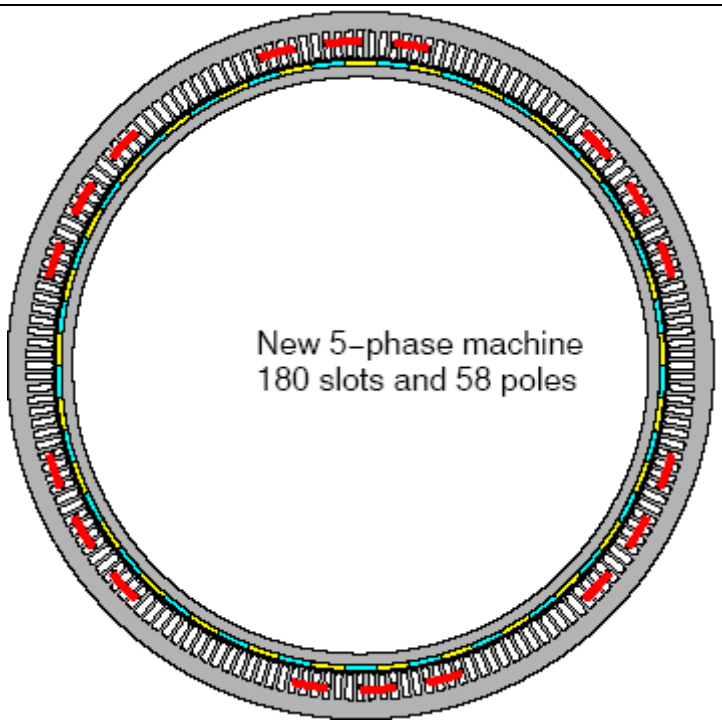


Figure 53: configuration de la nouvelle machine qui ne diffère de la machine triphasée d'origine que par le nombre de pôles (58 pôles au lieu de 60) et le nombre d'encoches (180 encoches au lieu de 216). Le nombre d'encoches par pôle et par phase est de 18/29 en pentaphasé au lieu 6/5 en triphasé, extrait de 26[R15]

Effective length	1.125 m
stator diameter D	1.6 m
stator yoke thickness	0.05 m
mechanical airgap g	0.005 m
rotor yoke thickness	0.03 m
magnet layer thickness	0.015 m
remanent flux density B_r	1.17 T
magnet volume	83.5×10^{-3} m^3
slot width (τ_s, tooth pitch)	0.5 τ_s
slot width opening	0.25 τ_s
slot-closing thickness	0.005 m
slot depth	0.065 m
active copper volume V_{Cu}	95.6×10^{-3} m^3
linear load A	6.17×10^4 A/m
current density j_s	3.65×10^6 A/m^2

Figure 54: caractéristiques de la machine triphasée de référence, extrait de 26[R15]

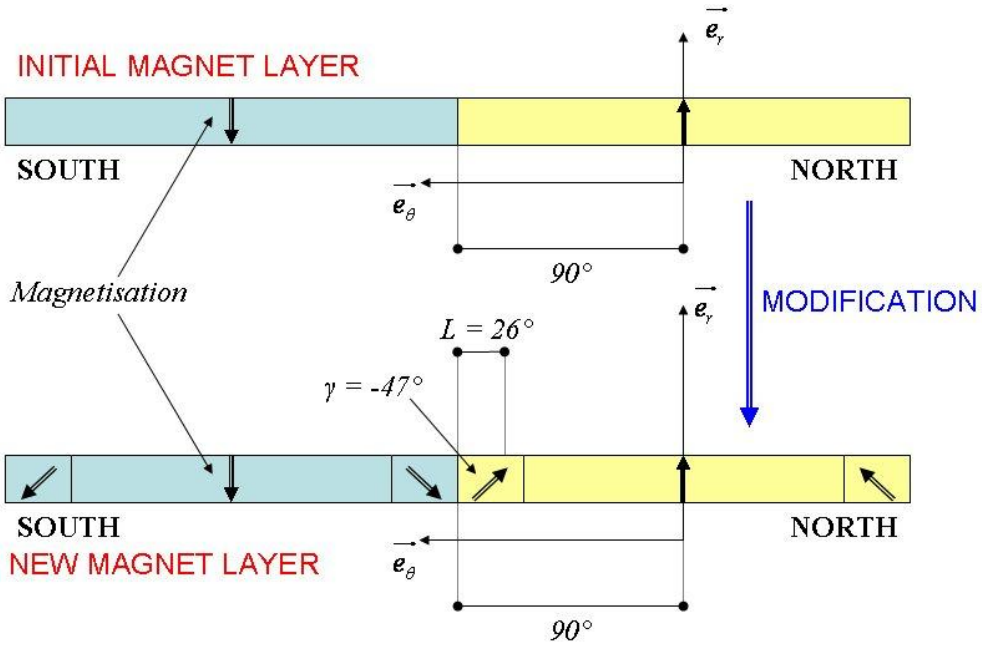


Figure 55: configurations d'aimants étudiés, extrait de [R15]

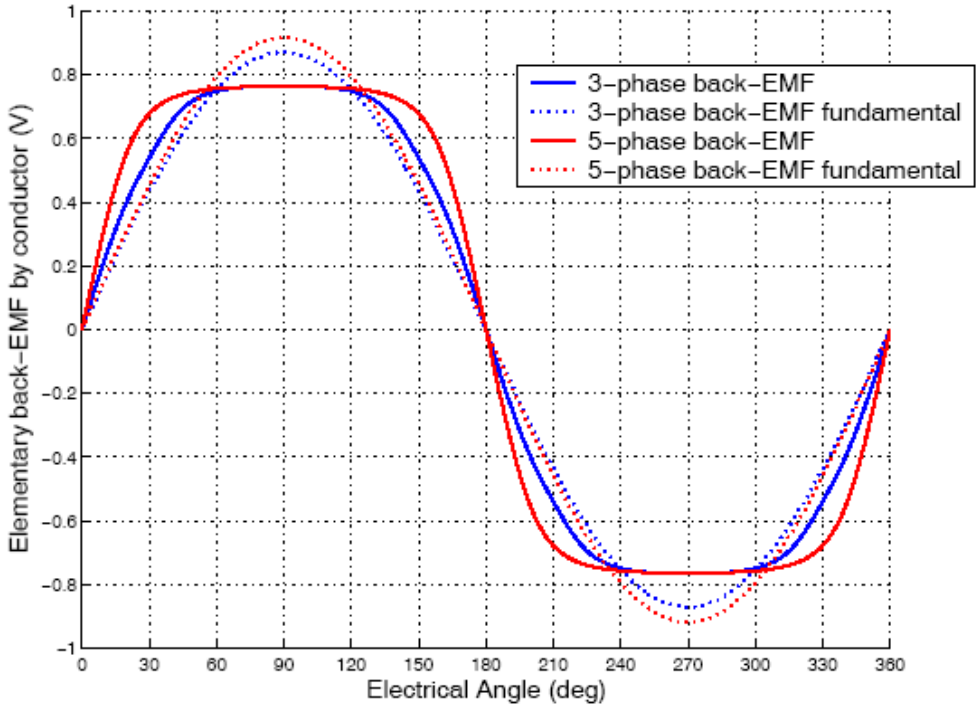


Figure 56: comparaison des forces électromotrices et de leur premier harmonique associé extrait de [R15]

Dans cette dernière publication, il a été mis en exergue que la conception d'une machine polyphasée devait être de type multi-critères avec notamment la prise en compte des contraintes de l'alimentation en MLI dès la conception de la machine.

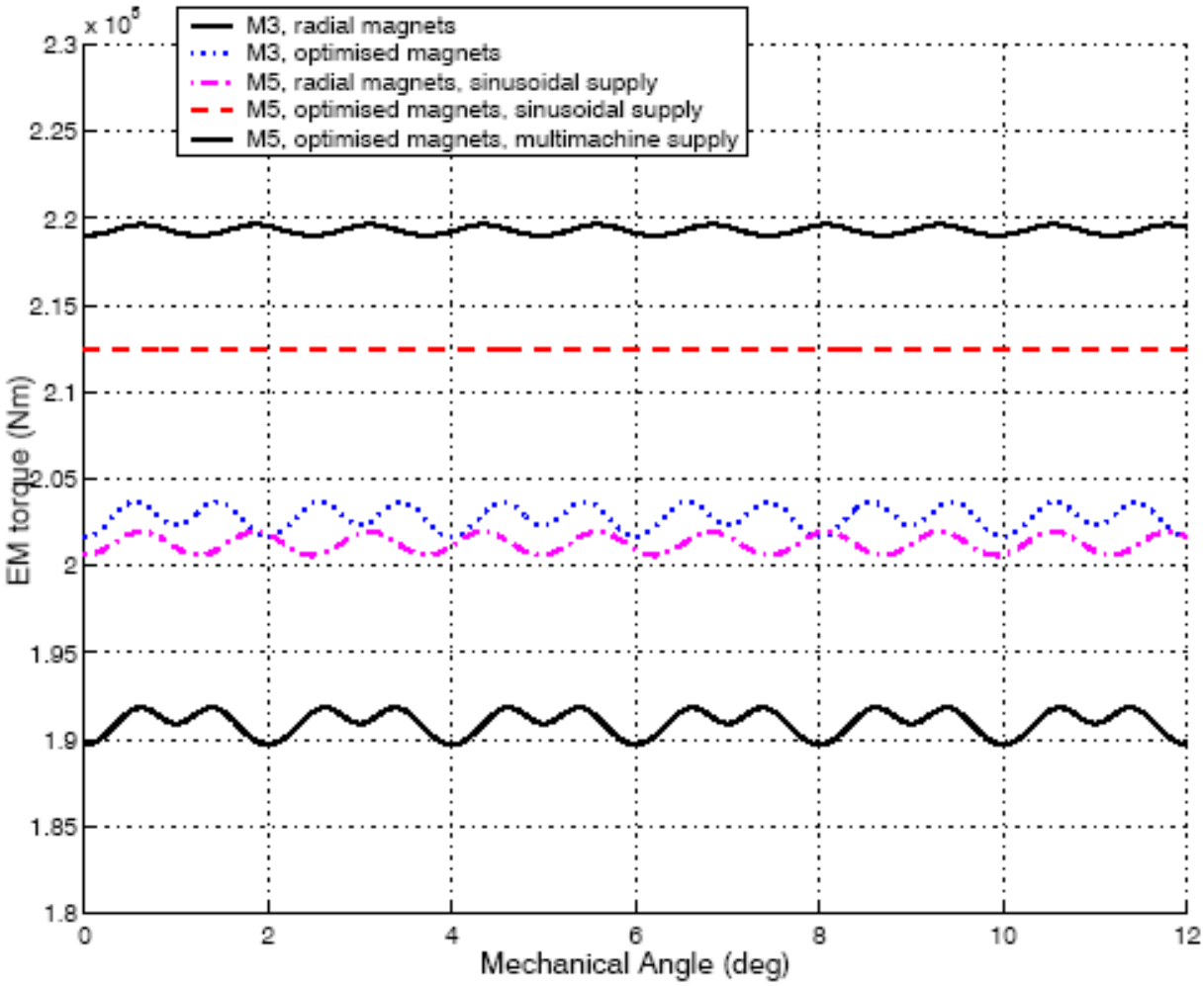


Figure 57: comparaison des couples en fonction de la couche d'aimant (optimisée ou radiale) et en fonction de la nature des courants statoriques imposés (sinusoidaux purs ou comportant les harmoniques 1 et 3), extrait de [R15]

3. Conclusion

On clôt cette annexe par un synoptique présenté dans la thèse (Figure 58) rappelant les différentes étapes de la méthode proposée pour la conception d'une machine polyphasée.

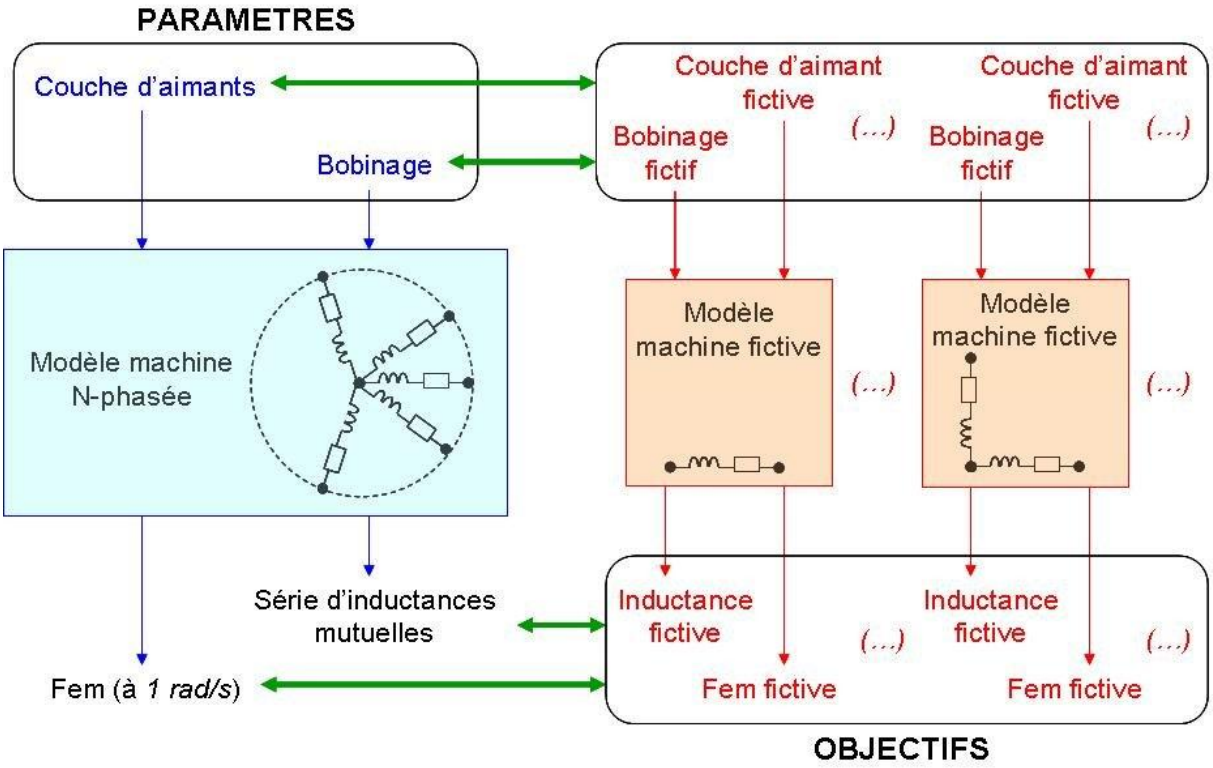


Figure 58: démarche de conception proposée dans la thèse de Franck Scuiller (extrait de [T4])

Synthèse des travaux de publications de Fabrice Locment

La thèse de Fabrice Locment a comporté deux volets : l'un concernait la conception d'un prototype à flux axial, technologie utilisée pour l'éolienne J48 développée par le groupe Jeumont/Framatome, l'autre la mise en œuvre d'une commande vectorielle notamment en mode dégradé de cette machine.

Bien entendu, une des caractéristiques particulières de ce prototype était son nombre de phases égal à sept. Ce choix permet, avec un nombre minimal de phases, de satisfaire plusieurs critères : d'une part de profiter aisément de l'harmonique de rang trois, favorable à une meilleure exploitation des aimants pour la création du couple, et d'autre part de conserver, en mode dégradé, la même structure de commande vectorielle avec PI qu'en mode normal pour les deux des machines fictives à l'origine du couple. Pour la troisième machine fictive, l'utilisation d'un PI sera encore suffisante aux basses vitesses. Lorsque la vitesse augmente il faut (thèse d'Yvan Crévits en cours) utiliser des correcteurs plus adaptés tels que les correcteurs résonants ou encore des correcteurs large bande.

Après réalisation d'un dimensionnement analytique, l'étude du prototype, par le code Eléments Finis CARMEL du laboratoire, a été réalisée en collaboration étroite avec Thomas Henneron par adaptation du code de calcul notamment pour tenir compte du léger déphasage[60] spatial existant entre les deux rotors. La modélisation numérique a permis de quantifier plus finement les spectres de la force électromotrice, le couple de détente ainsi que les inductances. Plus précisément, l'accent se porta sur l'étude de la sensibilité de ces grandeurs en fonction des harmoniques si on prend comme référence une machine triphasée.

Le papier [R12] a été consacré à cette idée : il met en évidence qu'une approche analytique classique au premier harmonique A_{H1} est insuffisante et qu'une approche multi-harmonique A_T, évidemment plus lourde, est nécessaire afin de pouvoir déterminer de façon suffisamment précise les paramètres caractéristiques à l'origine de courants parasites[61]. La simulation numérique *FEM* a permis de valider l'approche analytique multi-harmonique A_T pour ce qui est de l'inductance cyclique de chaque machine fictive ainsi que de la force électromotrice. Il a été mis en exergue que si l'on se contente d'examiner la force électromotrice d'une phase ou les inductances propres et mutuelles, alors, en première approche, la méthode basée sur le premier harmonique A_{H1} permet d'obtenir des résultats quantitatifs qui

[60] de façon à réduire le couple de détente

[61] On rappelle que ces courants parasites peuvent conduire à un surdimensionnement des interrupteurs ou une augmentation de la fréquence de MLI ou même à l'extrême à l'introduction de bobines de « lissage » en série avec les phases de la machine.

semblent suffisants. Par contre, elle est insuffisante pour déterminer avec la précision nécessaire les paramètres de toutes les machines fictives. Ainsi la détermination des constantes de temps qui jouent un rôle important pour le choix des fréquences de MLI n'est pas correcte (Tableau 12).

Tableau 12 (extrait de [R12])

VALEURS DES CONSTANTES DE TEMPS DES MACHINES FICTIVES PAR 3 APPROCHES

	FEM (ms)	**A_{H1} (ms)**	**A_T (ms)**
τ_{M1}	108,5	100,6	103,2
τ_{M2}	8	0	6,3
τ_{M3}	15,8	0	13,2

Tableau 13: extrait de [R12]

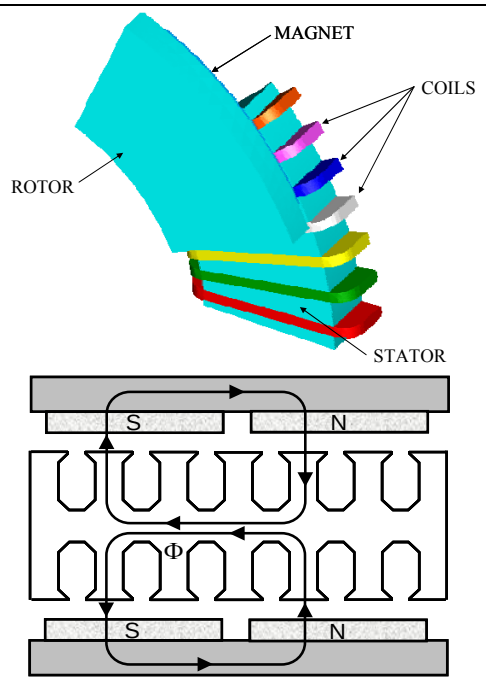


Figure 59: représentation de la machine axiale de type N-N

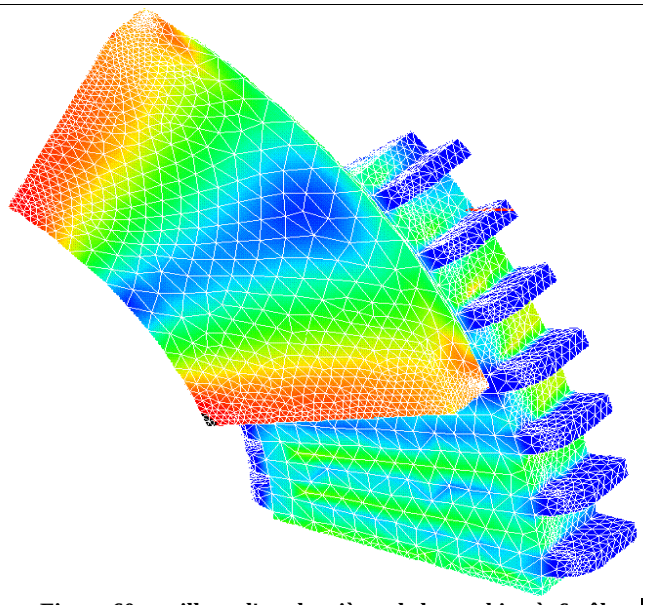


Figure 60: maillage d'un douzième de la machine à 6 pôles

Tableau 14 : INDUCTANCE PROPRE DE LA MACHINE REELLE PAR 3 APPROCHES ET ERREURS RELATIVES

	FEM (mH)	**A_{H1} (mH)**	**A_T (mH)**	**ε_1**	**ε_2**
L_{11}	19,75	14,6	18	-26%	-9%

Tableau 15: Inductances des machines fictives par 3 approches et erreurs relatives

	FEM (mH)	**A_{H1} (mH)**	**A_T (mH)**	**ε_5**	**ε_6**
L_{M1}	55	51	52,3	-7%	-5%
L_{M2}	4,1	0	3,2	-100%	-22%
L_{M3}	8	0	6,7	-100%	-16%

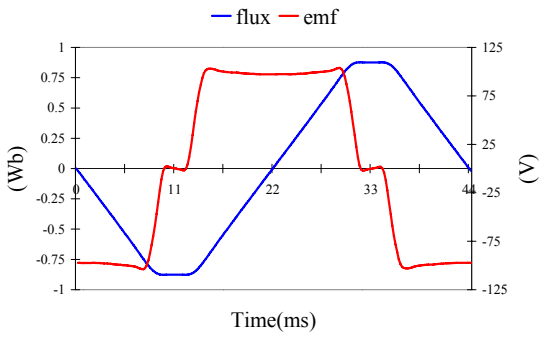


Figure 61: force électromotrice et flux associé

Tableau 16: valeurs efficaces des forces electromotrices par 3 approches et erreurs relatives

	FEM (V)	A_{H1} (V)	A_T (V)	ε_3	ε_4
e_{M1}	87	84	85,5	-7%	-2%
e_{M2}	8	0	7,7	-100%	-3%
e_{M3}	20	0	19,3	-100%	-3,5%

Deux autres publications [CI16] [CI19] ont été consacrées à la caractérisation de la machine à sept phases en comparant résultats expérimentaux et résultats obtenus par simulation numérique, mettant en évidence un bon accord notamment pour l'évaluation du couple de détente ou les forces d'attraction axiales (Figure 62 à Figure 68).

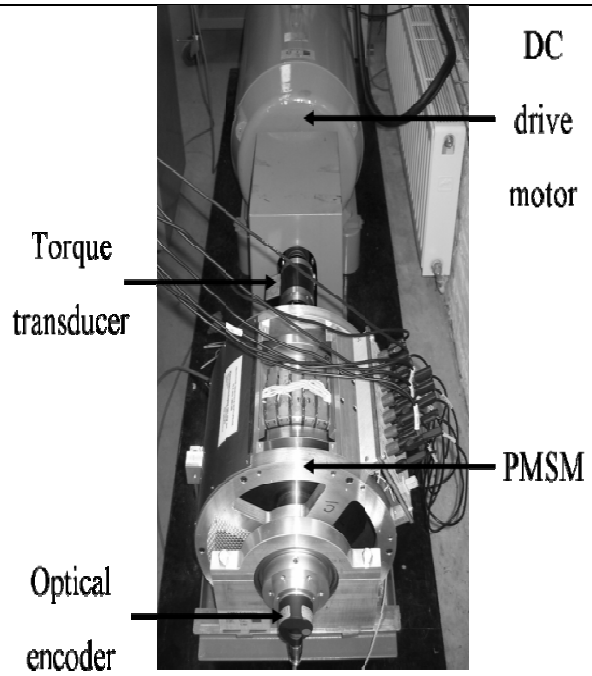


Figure 62: banc expérimental (extrait de [CI19])

PARAMETRES ET DIMENSIONS DE LA MACHINE (EXTRAIT DE [CI19]

Number of poles (2p)	6
Number of phases	7
Number of slots	42
Pole-arc-ratio	0.8
Core outer diameter Do (mm)	310
Core inner diameter Di (mm)	154
Axial length of stator core (mm)	78.3
Axial length of one rotor core (mm)	18.4
Axial length of one magnet (mm)	2.8
Length of one airgap (mm)	1
Slot dimensions (mm)	11.5 × 6.3
Number of wires in a slot	40
Slot fill factor (%)	44
Wire type	AWG18
Core soft composite material type (QMP)	ATOMET EM1
Magnet type	NdFeB N48
Mean flux density in airgap (T)	0.7
Cogging torque peak (Nm)	4
Cogging torque p.u.	0.06
Electrical loading at (Do+Di)/4 (kA/m)	11,5
Nominal Speed (rpm)	750
Nominal Torque with 50°C in winding (Nm)	65
Nominal power at 750 rpm (kW)	5.1
Nominal current at 65 Nm (A)	5.1

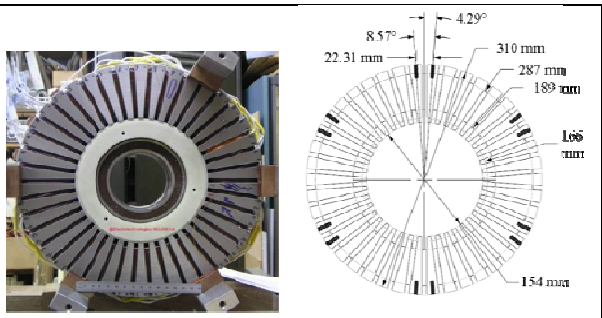


Figure 63: stator (extrait de [CI19])

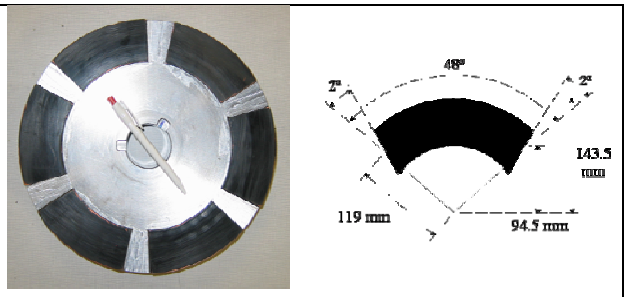


Figure 64: un rotor (extrait de [CI19])

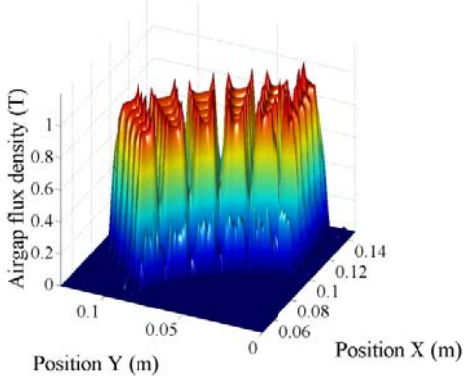


Figure 65: représentation de l'amplitude du champ magnétique sous un pôle (extrait de [CI19])

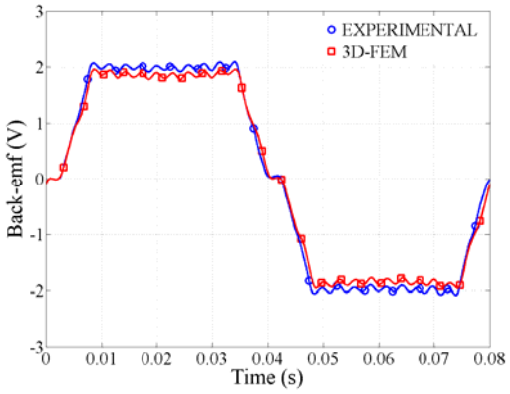


Figure 66: comparaison entre fem expérimentale et calculée (extrait de [CI19])

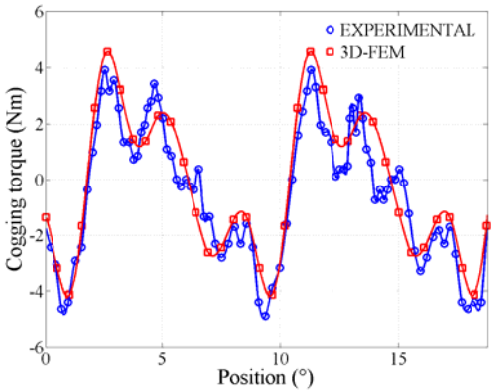


Figure 67: comparaison couplé de détente expérimental et calculé (extrait de [CI19])

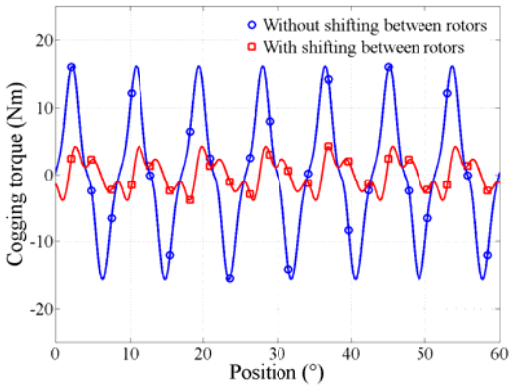


Figure 68: comparaison couples de détente calculés avec ou sans décalage des rotors (extrait de [CI19])

Le second volet des publications [CI23][R14] concerna la commande vectorielle de la machine, notamment en mode dégradé avec une ou deux phases non alimentées afin de montrer qu'il était possible, si la machine à sept phases vérifiait certaines propriétés harmoniques, de conserver en régime

dégradé, le même modèle de la machine ainsi que la même structure de commande de type vectorielle dans des repères tournants de type dq.

La démarche est en premier lieu de montrer la capacité d'une machine à 7 phases à travailler avec une ou deux phases non alimentées. Par contre, il est mis en évidence qu'en l'absence de modifications de commande, des couples pulsatoires de forte amplitude apparaissent (Figure 69 et Figure 70). Dans un deuxième temps, une commande originale se basant sur le fait que la force électromotrice d'une des trois machines fictives a été conçue pour être nulle est présentée. Un des points forts de cette approche est qu'elle permet de conserver la structure de commande vectorielle développée en mode normal : des asservissements avec correcteurs PI dans les repères tournants (Figure 72). Cette approche est en effet à mettre en regard avec les approches proposées classiquement qui recalculent dans le repère statorique des références variables dans le temps, nécessitant de ce fait des correcteurs large bande (hystérésis) tout à fait acceptables dans des prototypes de faible puissance mais souvent inacceptables pour le contrôle de machines de plus forte puissance. Par ailleurs, cette approche basée sur une inversion causale et une représentation multimachine (Figure 71) conserve en mode dégradé le même modèle de la machine qui est considéré inchangé malgré une diminution de sa commandabilité liée aux phases non alimentées.

Ce type de commande en mode dégradé avec faible couple pulsatoire est même possible avec une machine alimentée avec des courants de phase non-sinusoidaux (Figure 73 à Figure 76)

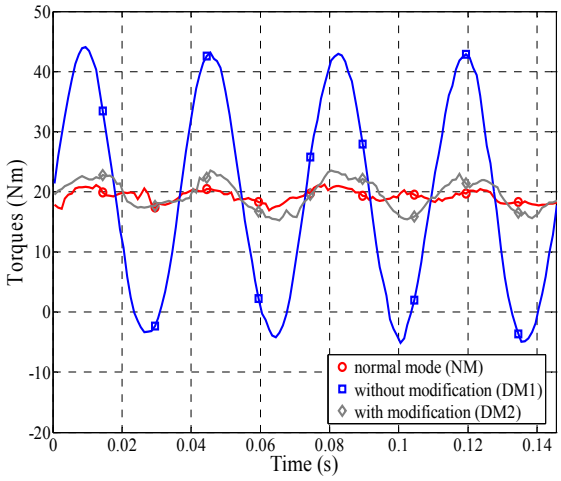


Figure 69: mise en évidence de la présence de couple pulsatoire en mode dégradé sans modification de commande (DM1) par rapport au mode normal (NM) en comparaison avec l'approche proposée (DM2) (extrait [CI23])

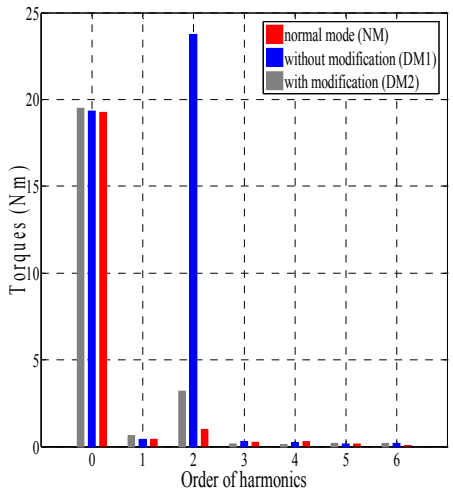


Figure 70: spectres des pulsations de couples de la Figure 77 (extrait [CI23])

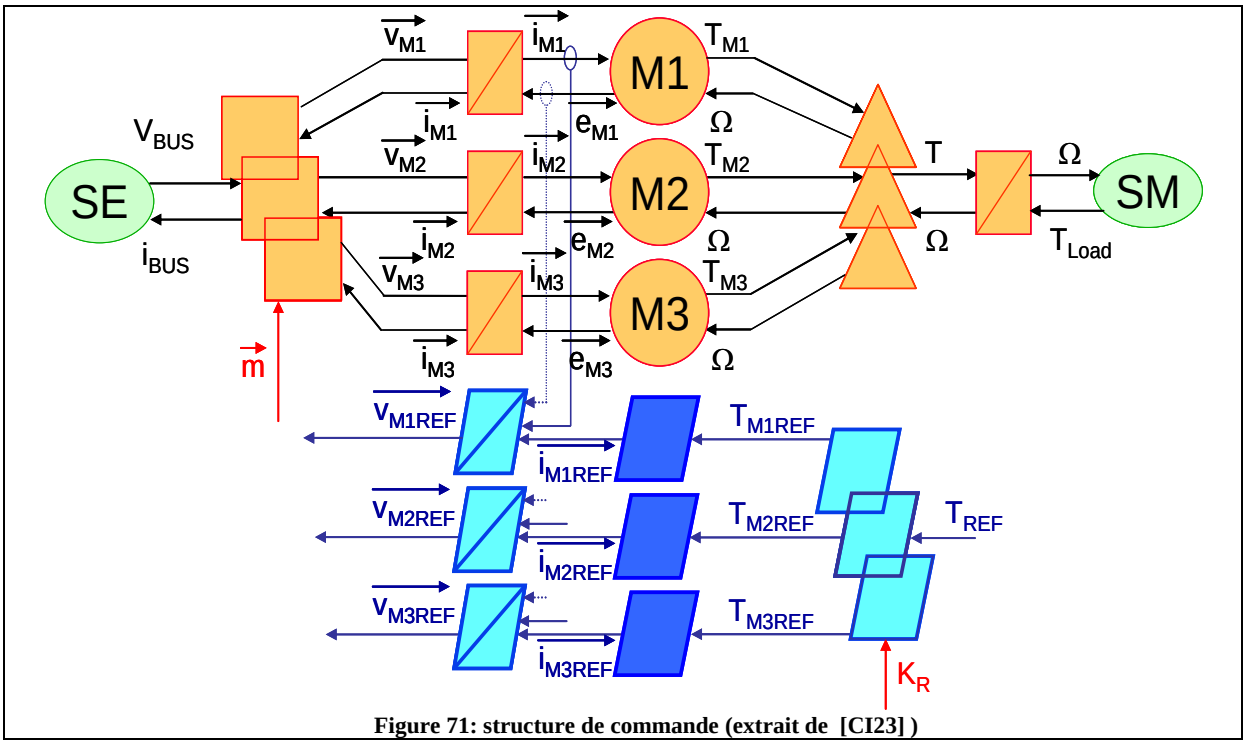


Figure 71: structure de commande (extrait de [CI23])

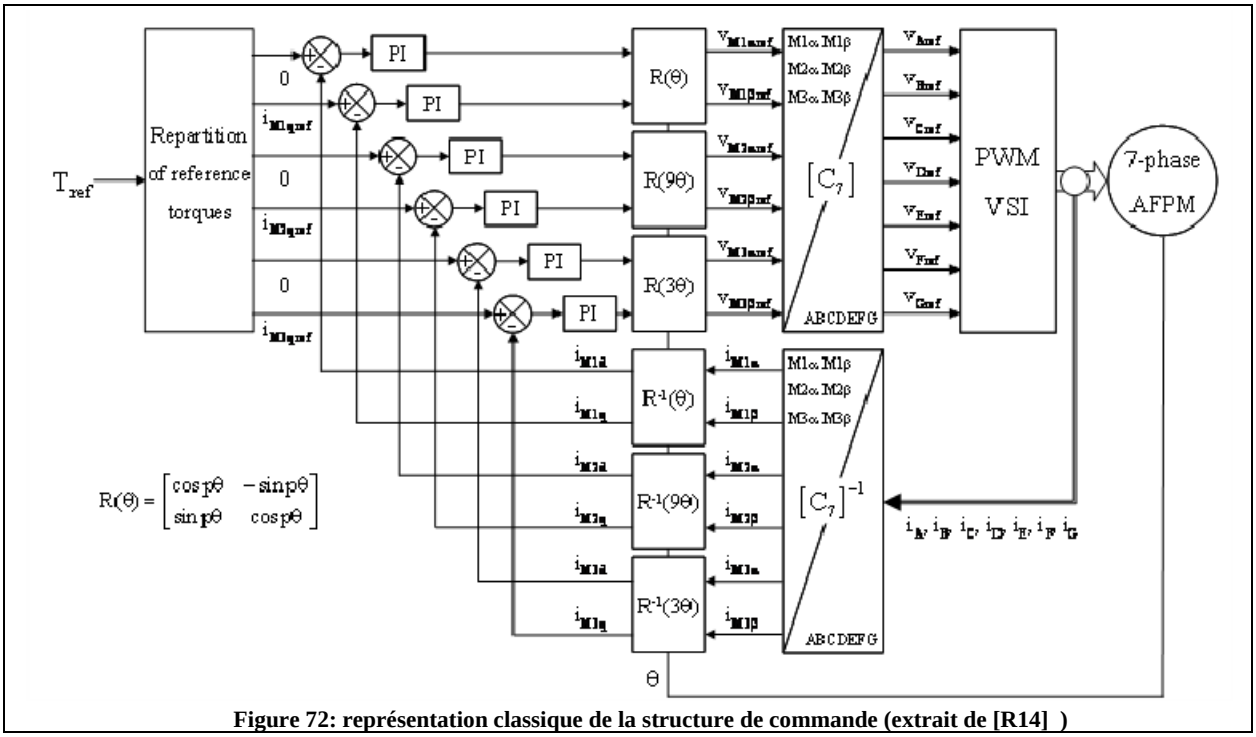


Figure 72: représentation classique de la structure de commande (extrait de [R14])

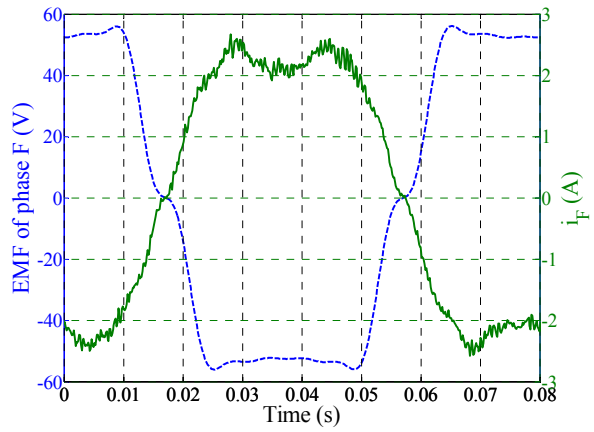


Figure 73: force électromotrice et courant en mode normal (extrait de [R14])

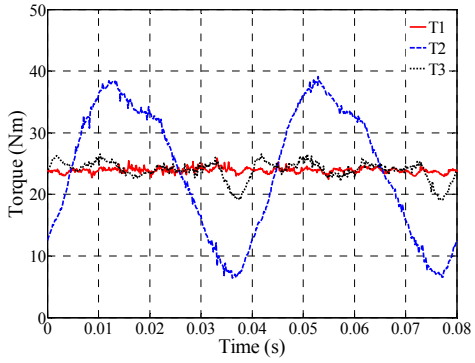


Figure 74: couples mesurés en mode normal (T1), dégradé (T2) sans modification de commande, dégradé avec commande améliorée et courants non sinusoidaux (T3) (extrait de [R14])

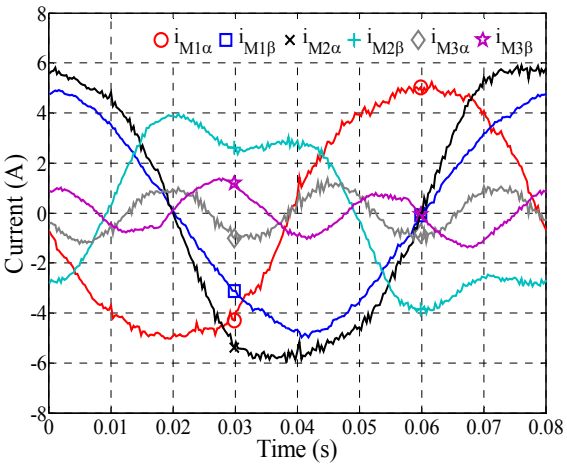


Figure 75: nouveaux courants des machines fictives en mode dégradé et commande optimisée (extrait de [R14])

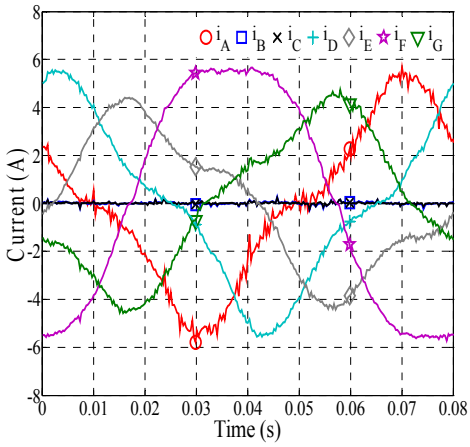


Figure 76: nouveaux courants dans les phases réelles en mode dégradé et commande optimisée (extrait de [R14])

Enfin, une publication en revue [R13] s'est attachée à mettre en évidence l'impact de la conception sur les caractéristiques de la machine. Plus précisément, on montre les réductions importantes des pulsations de couple, obtenues pour une même commande, qui ont pu être obtenues en s'imposant une simple contrainte harmonique dès la conception de la machine.

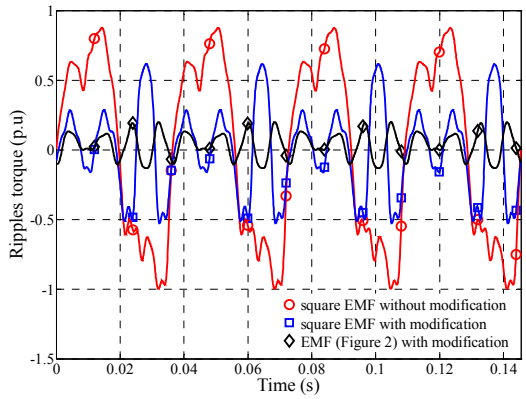


Figure 77: comparaison dans le cas « deux phases ouvertes » des pulsations de couples dans le cas d'une fem rectangulaire avec (rond rouge) ou sans (carre bleu) commande améliorée en prenant comme référence le résultat (losange) obtenu avec le prototype commandé

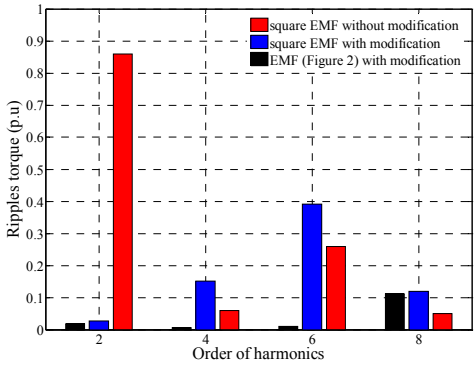


Figure 78: spectres des pulsations de couples de la Figure 77 (extrait de [R13])

Université Lille1
Sciences et Technologies

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Génie Electrique

NOM/PRENOM DU CANDIDAT : SEMAIL ERIC

JURY :

Directeur de Thèse :PIRIOU Francis

Rapporteurs : FADEL Maurice ; MULTON Bernard ; VIAROUGE Philippe

Membres : HAUTIER Jean-Paul ; MARCHAND Claude ; MEIBODY-TABAR Farid

TITRE :

Entrainements Electriques Polyphasés :

vers une approche Systeme

RESUME :

Le transport de l'énergie électrique par des réseaux triphasés a conduit par le passé au développement de convertisseurs électromécaniques triphasés. Ces derniers ont bénéficié de l'essor des interrupteurs de puissance et de celui des composants de commande type Digital Signal Processor (DSP). Les performances de ces classiques machines électriques triphasées associées à des onduleurs s'en sont trouvées accrues notamment dans le domaine de la vitesse variable.

Néanmoins des problèmes apparaissent tant au niveau de l'onduleur que de la machine lorsqu'on désire augmenter la puissance transmise. Les interrupteurs doivent en effet alors commuter des tensions et des courants d'amplitude plus élevée (coût unitaire plus élevé pour les modules et pollution électromagnétique accrue). Par ailleurs, à courant donné, l'augmentation de la puissance mène à des contraintes en tension pour les isolants. Ce dernier effet de contrainte (accélération du vieillissement des diélectriques) est d'autant plus accentué lorsque la machine est alimentée « classiquement » par un onduleur de tension fonctionnant en Modulation de Largeur d'Impulsions. Une piste classique pour la résolution de ces problèmes est celle, toute électronique, des convertisseurs multi-niveaux.

Un fractionnement de la puissance par **augmentation du nombre de phases** de la machine est une solution alternative et/ou complémentaire. A puissance et courant donnés les contraintes en tension diminuent. La multiplication du nombre de phases permet l'utilisation de modules d'électronique de puissance identiques de moindre coût unitaire (élément favorable en terme de coût de maintenance). De plus, ce type de structure polyphasée permet d'augmenter la tolérance aux pannes du convertisseur électromécanique. En fait, il s'agit de répartir les contraintes entre le convertisseur électromécanique et le convertisseur statique. De même, dans le cas des machines basses tensions (automobile par exemple), la présence de courants d'intensité très élevée nécessite en général une mise en parallèle de nombreux interrupteurs qu'il peut être judicieux (pour des raisons de surdimensionnement notamment) de répartir entre plus de 3 phases. Là encore, les machines polyphasées constituent une alternative économique d'autant qu'elles permettent de réduire les pulsations de couple et donc le bruit d'origine électromagnétique.

La problématique de recherche est l'étude et le développement **d'ensembles complets** comprenant le convertisseur statique, le convertisseur électromécanique polyphasé ainsi que la commande. En effet, l'adéquation entre la machine et le convertisseur est encore plus nécessaire que dans le cas d'une machine triphasée, la commande du convertisseur ne pouvant raisonnablement compenser certains défauts constructifs de la machine. Ainsi, un onduleur de tension qui alimente une machine polyphasée dont le bobinage est optimisé pour obtenir une force magnétomotrice sinusoidale va induire des courants parasites de forte amplitude dans la machine. Il est ainsi nécessaire de reprendre la conception du bobinage pour « désensibiliser » la machine.

L'adéquation du convertisseur électromécanique au convertisseur statique est recherchée **d'une part** en **agissant** sur les **paramètres constructifs de la machine** polyphasée afin de l'adapter le plus possible au convertisseur dont le caractère discret impose des contraintes à la machine. **D'autre part**, on agit également sur les degrés de liberté offerts par la **commande du convertisseur** statique (choix des vecteurs tension activés) afin d'exploiter au mieux la machine polyphasée (réduction des courants parasites, marche dégradée…).

C'est donc une approche SYSTEME qui allie simultanément la conception de machine à celle de la commande de convertisseur d'électronique de puissance.