

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

THESE

Préparée au :

Département d'Electrotechnique

Présentée par :

BOUCETTA Abdelhamid

**Magister en Electrotechnique
Option : Machines Electriques**

Pour l'obtention du titre de :

Docteur en sciences

Spécialité : Génie Electrique

CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DU COUPLE D'UNE MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE POLYDISCOIDE

Soutenue le : **07- Juillet -2009**

Devant le Jury composé de :

Pr : Farid NACERI	<i>Professeur</i>	<i>Univ.Batna</i>	Président
Dr : Mohamed .Lokmane BENDAAS	<i>Maître de conférences</i>	<i>Univ.Batna</i>	Rapporteur
Dr : Salah SAAD	<i>Maître de conférences</i>	<i>Univ.Annaba</i>	Examineur
Dr : Lazhar HEROUS	<i>Maître de conférences</i>	<i>Univ.Annaba</i>	Examineur
Dr : Abderrahmane DIB	<i>Maître de conférences</i>	<i>Univ.O.M.Bouaghi</i>	Examineur
Dr : Khaled CHIKHI	<i>Maître de conférences</i>	<i>Univ.Batna</i>	Examineur

Avant-propos

Le travail présenté a été effectué au sein du département d'électrotechnique de Batna, sous la direction du Maître de Conférences M.L. BENDAAS.

J'exprime ma profonde gratitude à M.L. BENDAAS, je le remercie très chaleureusement pour son encadrement et son soutien tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier les membres du jury pour leurs appréciations sur ce travail, sous la présidence du Professeur F.NASRI enseignant au département d'électrotechnique de Batna:

Monsieur S.SAAD, Maître de conférences à l'université de Annaba.

Monsieur L.HAROUS, Maître de conférences à l'université de Annaba.

Monsieur A.DIB, Maître de conférences à l'université de Oum el bouaghi.

Monsieur K.Chikhi, Maître de conférences à l'université de Batna.

Je tiens à remercier notre chef de département d'électrotechnique pour son aide très précieuse, et l'accomplissement de ce travail.

Ma reconnaissance va également à tous mes collègues enseignants et personnels administratifs qui m'ont apporté leurs concours.

Je tiens finalement à remercier tous mes collègues et amis pour l'ambiance qu'ils ont su créer et entretenir.

A. Boucetta

ملخص الأطروحة

حاليا تعتبر الآلات الكهربائية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة والتي جزؤها الدوار عبارة عن مجموعة أقراص صلبة، من الآلات الكهربائية الأكثر أهمية وهذا بما تمتاز به من خصائص كالدقة في تحديد الموضع والعزوم المزدوجة المهمة بالنسبة إلى القصور الذاتي الأقل، إضافة إلى قابليتها للاستخدام في الترددات العالية. إن هذه الامتيازات جعلت منها عنصرا جديدا وجذابا في سوق تصنيع الآلات. ليس من ناحية الاداء فحسب بل من ناحية تكلفة التصنيع أيضا. لهذا دراسة إمكانية تقييم هذا النوع من الآلات ذات الثغر الهوائية المتعددة مقارنة بالآلات الاعتيادية، يرى فيها إمكانية المشاركة في إثراء واستنباط طرق تحسين أكثر في أدائها خاصة في عملية رفع في عزوم المزدوجة أكثر وهذا رغم ضعف مردودية هذه الآلات.

إذن في دراستنا هذه الآلة التي سيشملها بحثنا هي من نوع الممانعة المغناطيسية المتغيرة ذات الأقراص الصلدة المتداخلة والمتوالية سواء في الجزء الثابت أو الدوار التي نجد مثبت فيها مغناط على شكل شبه منحرف.

قسمت هذه الأطروحة إلى خمس فصول. الفصل الأول تم عرض حال الآلات الكهربائية الأكثر استخداما في الهندسة الكهربائية. إضافة إلى التركيبات الشكلية و الهندسية. للآلات ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة والمتعددة الأقراص. بينما الفصل الثاني خصص لدراسة هذه الآلة الأخيرة حيث استنبطت معادلات تشغيلها على شكل أنماط يمكن أن تستبدل الآلة في حالة المحاكاة وأيضا تمكنا من مقارنة هذه الآلة بالآلات المترامنة.

الدراسة المثلى لعزوم المزدوجة المتوسطة كدالة في مربع التيار الكهربائي القممي والتيار الكهربائي الفعال، وهذا للأشكال المختلفة للتيار (مثلثات. جيبيات) التي قد تم دراستها في الفصل الثالث، حيث هذه التيارات يتم الحصول عليها من مغير الكتروني لتغذية الآلة (شبه منحرف. جيبي.....) ومن خلال هذا نستنبط القيمة العظمى لعزوم المزدوجة. دراسة هذه الآلة وهي مغذاة من الشبكة الكهربائية رغم مساوئها (عزوم المزدوجة الضعيف مثل شكل هذا التيار) هي موضوع الفاصل الرابع. حيث تم التطرق إلى استقرار الآلة من عدمها. الفصل الخامس تم معالجة التحكم في هذه الآلات مستخدما تقنية التحكم الشعاعي في معلم $d-q$ ، وهذا من خلال عملية المحاكاة للآلة وملحقاتها مستخدما بعض الفرضيات لتبسيط المنظومة. وتم تنويع هذه الأطروحة بالإلحاح على دراسة مثل هذه الآلات لإدخالها حيز العمل في الصناعة الجزائرية.

* * *

TABLE DES MATIERES

<i>Introduction générale</i>	2
<i>Chapitre I : Etat de l'art</i>	
I.1 Introduction	7
I.2 Comparaison des performances des machines usuelles avec celles à réluctance variable	8
I.2.1 Les machines à courant continu	9
I.2.2 Les machines asynchrones	10
I.2.3 Les machines synchrones	11
I.2.3.1 Les machines synchrones à rotor bobiné	11
I.2.3.2 Les machines synchrones à aimants permanents	12
I.2.4 Les machines à réluctance variable	13
I.3 Conclusion	14
I.4 Topologies des machines à réluctance variable polydiscoïde	14
I.5 Conclusion	18
I.6 Bibliographie	19
<i>Chapitre II : Etude de la machine à réluctance variable polydiscoïde</i>	
II.1 Introduction	24
II.2 Description de la machine	25
II.3 Principes généraux	26
II.4 Etude des M.R.V en régime moteur	28
II.4.1 Présentation des M.R.V polydiscoïdes	28
II.4.2 Alimentation sinusoïdale	31
II.5 Conclusion	34
II.6 Bibliographie	35
<i>Chapitre III : Optimisation du couple de la MRV polydiscoïde</i>	
III.1 Introduction	41
III.2 Formes d'ondes de courants optimales	41
III.3 Maximisation du couple moyen par les courants maximaux	43
III.4 Maximisation du couple moyen par les courants efficaces	44

III.5 Conclusion sur les formes d'ondes du courant optimal	45
III.6 Calcul du couple moyen pour quelques formes d'ondes classiques	46
III.6.1 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ demi-sinusoïdal	47
III.6.2 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ demi-sinusoïdal	48
III.6.3 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ rectangulaire	50
III.6.4 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ rectangulaire	51
III.6.5 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal avec composante continue	52
III.6.6 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal sans composante continue	53
III.6.7 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal avec composante continue	54
III.7 Comparaison des résultats obtenus	56
III.8 Alimentation de la MRVP par des courants sinusoïdaux	58
III.9 Alimentation de la MRVP par des courants rectangulaires	60
III.10 Alimentation de la MRVP par des courants triphasés rectangulaires	62
III.11 Conclusion	63
III.12 Bibliographie	65

Chapitre IV : Alimentation de Machine à réluctance variable par le réseau

IV.1 Introduction	70
IV.2 Notations	70
IV.3 Conditions d'extraction de la puissance	72
IV.4 Fonctionnement à une vitesse double de celle du synchronisme	73
IV.5 Fonctionnement à la vitesse de synchronisme	75
IV.5.1 Diagramme de Fresnel	75
IV.5.2 Extrémité du vecteur courant dans le plan de Fresnel	77
IV.6 Stabilité du point de fonctionnement	78
IV.6.1 Stabilité électrique du couplage	78
IV.6.2 Oscillations libres de la machine à réluctance variable	79
IV.6.2.1 Notations	79
IV.6.2.2 Période des oscillations	80
IV.6.2.3 Effet des oscillations sur le maintien du synchronisme	81
IV.7 Autres types d'alimentation	82
IV.8 Conclusion	84
IV.9 Bibliographie	85

Chapitre V : Commande vectorielle de la MRVP	
V.1 Introduction	90
V.2 Modélisation de l'ensemble onduleur-machine en vue de la commande vectorielle	92
V.2.1 Machine à réluctance variable polyentrefer	92
V.2.2 Onduleur MLI	94
V.2.2.1 Alimentation	94
V.2.2.1.1 Onduleur de tension à MLI	95
V.3 La commande vectorielle de la MRV	95
V.3.1 Principe de la commande	95
V.3.2 Stratégie de la commande vectorielle	96
V.3.3 Structure de la commande	96
V.4 Simulation et interprétation	98
V.5 Conclusion	102
V.6 Bibliographie	103
Conclusion générale	106
Annexes	109

TABLE DES FIGURES

Table des figures

I.1 : Machines à courant continu	9
I.2: Machine asynchrone à rotor bobiné	10
I.3 : Machines synchrones à pôles saillants	11
I.4 : Machines synchrones à pôles lisses	12
I.5 : Machines synchrones à aimant permanent	12
I.6 : Machine à réluctance variable 6/4	13
I.7 : Machine à réluctance variable à disque imbriqués	16
I.8 : Machine à réluctance variable discoïde polyentrefer à bobinages globaux	16
I.9 : Moteur à disques à aimants alternés Cegelec-Nancy	17
II.1: Modèle électrique de la M.RV	26
II.2: Disque élémentaire (a), coupe de la machine polydiscoïde (b)	27
II.3: Positions remarquables	29
II.4 : Les caractéristiques énergétiques	30
II.5: Cycle idéal d'alimentation en créneau de courant	31
II.6 : Diagramme de Fresnel	34
III.1 : Modèle de la perméance de la machine sur la partie linéaire	42
III.2: Onde du courant i maximisant couple C_{moy}	43
III.3: Forme d'onde maximisant le courant i	45
III.4 : Formes de perméance et de courant maximisant I_{max} et I	46
III.5 : z (sinusoïdale), et i (demi-sinusoïdal)	47
III.6 : z (trapézoïdale), i (demi-sinusoïdal)	49
III.7: z (sinusoïdale), i (rectangulaire)	50
III.8: z (trapézoïdale), et i (rectangulaire)	51
III.9 : z (sinusoïdale), et i (sinusoïdal avec composante continue)	53
III.10: z (sinusoïdale), et i (sinusoïdal sans composante continue)	54
III.11 : z (trapézoïdale), et i (sinusoïdal avec composante continue)	55
III.12 : Perméance, courant et couple pour une alimentation de la MRVP par des courants sinusoïdaux	58
III.13 : Energie transformée dans le plan flux-courant pour une alimentation de la MRVP par des courants sinusoïdaux	59

III.14 : Perméance, courant et couple pour une alimentation de la MRVP par des courants rectangulaires	60
III.15 : Energie transformée dans le plan flux-courant pour une alimentation de la MRVP par des courants rectangulaires	61
III.16 : Perméance, courant et couple pour une alimentation de la MRVP par des courants triphasés rectangulaires	62
IV.1: Courbe de flux, Réductance et les ampères-tours aux deux vitesses de synchronisme	73
IV.2 : Diagramme de Fresnel (cas $k=2$)	74
IV.3: Diagramme de Fresnel (cas $k=1$)	75
IV.4: Caractéristique de fonctionnement à U_o, I_c , et P_m imposés	78
IV.5: Alimentation en créneaux de tension	83
IV.6: Convertisseur à capacité série	83
V.1 : Ensemble de commande Onduleur-Machine	90
V.2 : Schématisation de l'ensemble convertisseur-MRVP	94
V.3 : Schéma de principe de la commande	97
V.4 : Schéma global de simulation	97
V.5 : Dynamique des courants direct et en quadrature	99
V.6 : Dynamique des flux direct et en quadrature	99
V.7 : Dynamique de la vitesse	100
V.8 : Dynamique du couple électromagnétique	100
V.9 : Dynamique des courants i_a, i_b, i_c	101
V.10 : Zoom sur la dynamique des courants i_a, i_b, i_c	101
V.11 : Dynamique du courant i_a	102
A.1 : Fonction de $\Delta I / I_{moy}$	111
A.2 : Fonction de $\Delta \theta$ pour ($0 \leq \theta \leq \pi$)	112
A.3 : Fonction de $\Delta \theta$ pour ($0 \leq \theta \leq 2 \pi$)	113

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

III.1 : Combinaisons de $i(\theta)$ et de $z(\theta)$	47
III.2 : Tableau de comparaison des résultats obtenus	56
III.3 : Tableau de comparaison des coefficients des courants obtenus pour le maximum du couple moyen	57

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Des évolutions importantes ont eu lieu ces dernières années grâce aux progrès réalisés dans les domaines des matériaux (magnétiques, mécaniques, thermiques..), de l'électronique de puissance (grandes puissances, grandes fréquences, nouvelles topologies...), de la commande (technologies numériques, méthodes de contrôle), des capteurs mais aussi des structures de moteurs. Tous ces progrès ont permis d'envisager des applications à vitesse variable de manière efficace.

L'entraînement direct représente la simplification ultime des systèmes de conversion d'énergie puisqu'il permet de s'affranchir des organes de transmissions mécaniques (réducteurs, multiplicateurs...) afin d'améliorer la fiabilité, la facilité de la maintenance, la réduction de l'encombrement, le coût et le niveau de bruit.

Pour améliorer la puissance spécifique des moteurs électriques, deux approches ont été adoptées par les chercheurs et les industriels. L'une consiste à introduire de nouvelles topologies de machines (moteurs à flux transverse, à flux axial, moteurs supraconducteurs...) qui sur le papier ont incontestablement un fort couple volumique, mais qui reste à l'état actuel au stade des prototypes. L'autre approche consiste à améliorer certaines structures de moteurs électriques déjà éprouvées.

Dans de nombreuses applications, il est nécessaire de disposer d'une machine à très forte densité d'effort en entraînement direct. Les solutions mettant en œuvre des dispositifs mécaniques intermédiaires de transformation (réducteur, vis écrou) limitent les performances dynamiques et la qualité de conversion en introduisant des contraintes supplémentaires au système d'entraînement telles que l'usure, le bruit, et l'inertie.

Les performances des dispositifs électromagnétiques sont limitées notamment par :

- Les caractéristiques des matériaux utilisés ;
- Les topologies ;
- Les échauffements ;
- La saturation magnétique ;
- Les contraintes mécaniques.

Les matériaux magnétiques ainsi que les dispositifs électroniques d'alimentation ont ouvert de nouvelles voies d'investigation dans le domaine de la conception des machines électriques.

L'accroissement des performances spécifiques au delà de cette limite nécessite soit l'emploi de matériaux "spécifiques" non conventionnels (supraconducteurs), soit une réduction du pas de déplacement conduisant à une augmentation de la fréquence de conversion. Pour profiter pleinement des effets de la réduction du pas dans un volume donné, il est très intéressant de fractionner la zone active en adoptant des structures *polydiscoïdes*.

L'objet de la présente thèse vise précisément à évaluer l'enjeu de cette nouvelle filière technologique des machines à réluctance variable dans le contexte des machines tournantes à hautes vitesses, et à couple-massique très élevés. Rechercher l'optimisation du couple des machines à réluctance variable polydiscoïdes peut se faire par :

- Développer l'architecture de la machine ;
- L'emploi de matériaux appropriés ;
- Le choix du type d'alimentation ;
- Le choix d'une technique de commande adéquate.

La première partie : A été d'abord portée sur la comparaison des performances de différentes machines avec celle des machines à réluctance variable de type discoïdes, et l'état de l'art des machines à réluctance variable utilisant des systèmes de petits plots magnétiques excités par des bobinages globalisés structure à *polyentrefer*.

La deuxième partie : L'étude générale de la machine à réluctance variable, la présentation des systèmes physiques concernant la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique sa mise en équation et les positions remarquables (stator-rotor).

La troisième partie : La structure polydiscoïde permet d'atteindre des performances couple et vitesse très intéressantes à condition de joindre un convertisseur d'alimentation.

Rechercher la forme du courant ou de la tension alimentant la machine à réluctance variable pour des critères d'optimisation du couple moyen en fonction du carré du courant maximal et le carré du courant efficace dans le régime (non saturé). Cette étude doit illustrer l'influence du choix de la forme du courant d'alimentation de la MRVP sur le transfert de puissance de la machine.

La quatrième partie : Dans ce chapitre l'étude du fonctionnement des machines à réluctance variable lorsqu'ils sont alimentés à partir d'une source de tension sinusoïdale (source) est primordiale. Cette alimentation est simple et théoriquement possible, comme sur n'importe

quelle machine de type synchrone; elle présente l'avantage de ne pas nécessiter l'emploi de convertisseurs statiques et son étude met en évidence les principaux paramètres de la machine à réluctance variable. Les équations ainsi obtenues sont en effet générales, facilement transformables au cas des génératrices et très proches de celles rencontrées sur les machines synchrones usuelles. Malgré ces inconvénients, ce type d'alimentation directe par le réseau est possible.

La cinquième partie : Tenant compte de toutes les limites que présente le fonctionnement de la machine avec capteur mécanique, de nombreuses études ont été faites pour supprimer ce capteur mécanique tout en préservant le bon fonctionnement de la machine. Ces études ont fait apparaître des différentes méthodes de la commande et en particulier la commande vectorielle avec ou sans capteur. La commande vectorielle des MRV nécessite une connaissance précise de la position du rotor. Cette connaissance peut être obtenue directement par un capteur de position ou indirectement par un capteur de vitesse.

Le modèle est généralement simplifié, en exprimant les équations électriques dans le repère de Park. Par un choix judicieux de la valeur du courant direct ainsi nous obtenons un modèle simple dans lequel le couple électromagnétique est contrôlé que par le seul courant en quadrature. Un algorithme de découplage permet de contrôler indépendamment les courants direct et en quadrature.

L'association de la machine-convertisseur alimenté par MLI est simulée et commentée sous MATHLAB-SIMULINK.

* * *

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Chapitre I : Etat de l'art

Sommaire

I.1 Introduction	7
I.2 Comparaison des performances des machines usuelles avec celles à réluctance variable	8
I.2.1 Les machines à courant continu	9
I.2.2 Les machines asynchrones	10
I.2.3 Les machines synchrones	11
I.2.3.1 Les machines synchrones à rotor bobiné	11
I.2.3.2 Les machines synchrones à aimants permanents	12
I.2.4 Les machines à réluctance variable	13
I.3 Conclusion	14
I.4 Topologies des machines à réluctance variable polydiscoïdes	14
I.5 Conclusion	18
I.6 Bibliographie	19

Notations utilisées dans le chapitre

M.C.C	:	Machines à courant continue
M.A.S	:	Machines asynchrones
M.S	:	Machines synchrones
MRV	:	Machines à réluctance variable
MRVP	:	Machines à réluctance variable polydiscoïdes

I.6 Bibliographie

- [1] B. Multon, "Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable", Revue 3EI n°3, Juin-1995, pp.3-8.
- [2] Y. Alhassoun, "Etude et mise en œuvre de la machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [3] C. Divoux, "Machine synchrone", Cours terminale STI, 1999.
- [4] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, M. Antunes, "Actionneur linéaire synchrone à aimants permanents multi-tiges", EF'2003 Électrotechnique du futur 9 et 10. Supélec. décembre 2003.
- [5] H. Ben Ahmed, L. Prévond, B. Multon, "Structures polyentrefers: solutions pour les entraînements directs ?", Colloque SEE, CEMD'99, Cachan, 4 février 1999, pp. 95-100.
- [6] C. Rioux, "Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques", Revue de Physique Appliquée, n°15, 1980, pp.1505-1515.
- [7] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, "Force Density Improvements from Increasing the Number of Airgap Surfaces in Synchronous Linear Actuators", IEE Proceedings, Electric power application Volume 150, Issue 01. January 2003, pp.106-120.
- [8] P. Letellier, "Les entraînements directs de forte puissance et à basse vitesses", CEMD'99, La conversion électromécanique directe, SEE-ENS, Cachan février 1999, pp.22-30.
- [9] D. Matt, "Etude de deux structures originales de machine à réluctance variable polyentrefers", thèse de doctorat, Paris 6, avril 1987.
- [10] J.P. Bastos, R. Goyet, J. Lucidarme, "Performances intrinsèques des machines à réluctances variables à disques imbriqués", revue de physique appliquée n°1, janvier 1985, pp.45-53.

- [11] Lewis E .Unnewehr," Magnetic circuit studies for an axial-gap réluctance motor", Electric machines and Electromechanics, An International Quarterly, n°1, 1976, pp.57-69.
- [12] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, " Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [13] P.F.Desesquelles, J. Lucidarme, H.Ben Ahmed, " Expérimentation d'une machine couplée à très hautes performances massiques", Colloque M.O.P.P, Lausanne (Suisse), Juillet 1990.
- [14] H. Ben Ahmed, " Contribution à la conception des machines synchrones à aimants permanents et bobinage global ", thèse de doctorat, Paris VI, janvier 1994.
- [15] K.Salamé," Etude des fonctionnements en moteur des machines à réluctance variable à disques imbriqués", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.
- [16] R. Michaux, P.Letellier, " Les machines discoïdes à champ axial dans les systèmes de propulsion électriques", REE N°3/1997, pp 37-42.

CHAPITRE II

ETUDE DE LA MACHINE A
RELUCTANCE VARIABLE
POLYDISCOIDE

Chapitre II : Etude de la machine à réluctance variable polydiscoïde

Sommaire

II.1 Introduction	24
II.2 Description de la machine	25
II.3 Principes généraux	26
II.4 Etude des M.R.V en régime moteur	28
II.4.1 Présentation des M.R.V polydiscoïdes	28
II.4.2 Alimentation sinusoïdale	31
II.5 Conclusion	34
II.6 Bibliographie	35

Notations utilisées dans le chapitre

M.R.V	:	Machines à réluctance variable
p	:	Nombre de plots magnétiques
ω	:	Pulsation électrique
x	:	Angle électrique
θ, θ_m	:	Angles mécaniques
ψ, φ	:	Décalages internes
U_0	:	Tension moyenne
U	:	Tension efficace
L_o	:	Inductance opposition
L_c	:	Inductance conjonction
ϕ	:	Flux magnétique
ϕ_o	:	Flux magnétique moyen
R	:	Réluctance
R_o	:	Réluctance moyenne
r	:	Premier harmonique de la réluctance
W	:	Energie
W'	:	Coénergie
I	:	Courant efficace alternatif
I_{max}	:	Courant de crête
I_c	:	Courant d'excitation continu

C_e	:	Couple électromagnétique
M	:	L'inductance mutuelle entre les bobinages
X_d	:	Réactance longitudinale
X_q	:	Réactance transversale
F	:	La force électromagnétique
W_e	:	Energie électrique
W_m	:	Energie mécanique
ψ	:	Angle entre E_o et U_o

II.6 Bibliographie

- [1] B. Multon, " Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à reluctance variable ", Revue 3EI n°3, Juin-1995, pp.3-8.
- [2] Y. Alhassoun, "Etude et mise en œuvre de la machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [3] C. Divoux, " Machine synchrone", Cours terminale STI, 1999.
- [4] P.E. Cavarec , H. Ben Ahmed, B. Multon, M. Antunes, " Actionneur linéaire synchrone à aimants permanents multi-tiges ", EF'2003 Électrotechnique du futur 9 et 10. Supélec. décembre 2003.
- [5] H.Ben Ahmed, L.Prévond, B.Multon, " Structures polyentrefers: solutions pour les entraînements directs ? ", Colloque SEE, CEMD'99, Cachan, 4 février 1999, pp. 95-100.
- [6] C. Rioux, "Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques", Revue de Physique Appliquée, n°15, 1980, pp.1505-1515.
- [7] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon , " Force Density Improvements from Increasing the Number of Airgap Surfaces in Synchronous Linear Actuators", IEE Proceedings, Electric power application Volume 150, Issue 01. January 2003, pp.106-120.
- [8] P.Letellier, " Les entraînements directs de forte puissance et à basse vitesses", CEMD'99, La conversion électromécanique directe, SEE-ENS, Cachan, février1999, pp.22-30.
- [9] D.Matt, " Etude de deux structures originales de machine à réluctance variable polyentrefere ", thèse de doctorat, Paris 6, avril 1987.
- [10] J.P.Bastos, R.Goyet, J.Lucidarme, "Performances intrinsèques des machines à réluctances variables à disques imbriqués", revue de physique appliquée n°1, janvier 1985, pp.45-53.
- [11] Lewis E .Unnewehr, " Magnetic circuit studies for an axial-gap reluctance motor", Electric machines and Electromechanics, An International Quarterly, n°1, 1976, pp.57-69.

- [12] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, " Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [13] P.F.Desesquelles, J. Lucidarme, H.Ben Ahmed, " Expérimentation d'une machine couplé à très hautes performances massiques ", Colloque M.O.P.P, Lausanne (Suisse), Juillet 1990.
- [14] H. Ben Ahmed, " Contribution à la conception des machines synchrones à aimants permanents et bobinage global ", thèse de doctorat, Paris VI, janvier 1994.
- [15] K.Salamé," Etude des fonctionnements en moteur des machines à reluctance variable à disques imbriqués", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.

CHAPITRE III

OPTIMISATION DU COUPLE DE LA M.R.V. POLYDISCOIDE

Chapitre III : Optimisation du couple de la MRV polydiscoïde

Sommaire

III.1 Introduction	41
III.2 Formes d'ondes de courants optimales	41
III.3 Maximisation du couple moyen par les courants maximaux	43
III.4 Maximisation du couple moyen par les courants efficaces	44
III.5 Conclusion sur les formes d'ondes du courant optimal	45
III.6 Calcul du couple moyen pour quelques formes d'ondes classiques	46
III.6.1 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ demi-sinusoïdal	47
III.6.2 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ demi-sinusoïdal	48
III.6.3 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ rectangulaire	50
III.6.4 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ rectangulaire	51
III.6.5 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal avec composante continue	52
III.6.6 Cas de $z(\theta)$ sinusoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal sans composante continue	53
III.6.7 Cas de $z(\theta)$ trapézoïdale et de $i(\theta)$ sinusoïdal avec composante continue	54
III.7 Comparaison des résultats obtenus	56
III.8 Alimentation de la MRVP par des courants sinusoïdaux	58
III.9 Alimentation de la MRVP par des courants rectangulaires	60
III.10 Alimentation de la MRVP par des courants triphasés rectangulaires	62
III.11 Conclusion	63
III.12 Bibliographie	65

Notations utilisées dans le chapitre

M.R.V.	:	Machines à réductance variable
M.R.V.P	:	Machines à réductance variable polydiscoïdes
p	:	Nombre de plots magnétiques de la machine
q	:	Nombre de pôles de la machine polyphasée
f	:	Fréquence
ω	:	Pulsation électrique
X	:	Angle électrique
θ, θ_m	:	Angles mécaniques
ψ, φ	:	Décalages internes
u	:	Tension instantanée
W	:	Energie
W'	:	Coénergie
i	:	Courant instantané
I	:	Courant efficace de i
I_{\max}	:	Courant de crête de i
I_{moy}	:	Courant moyen de i
ΔZ	=	$Z_c - Z_o$
$\Delta \theta$	=	$\theta_2 - \theta_1$
z	:	Perméance instantanée du circuit magnétique
Z_o	:	Perméance opposition
Z_c	:	Perméance conjonction
C_{moy}	:	Couple moyen
c	:	Couple instantané produit par la machine
θ_h	:	Position haute
θ_b	:	Position basse
θ_x	:	Position max (θ_b, θ_1)
θ_y	:	Position max (θ_h, θ_2)
A, B, C, D.....	:	Coefficients du courant
ΔI	:	Ondulation du courant de crête à crête

$z(\theta)$:	Perméance en fonction de l'angle θ
$i(\theta)$:	Courant en fonction de l'angle θ
a	:	Point d'inflexion
ξ	:	Position pour lequel on a I_{moy}
θ'	:	Nouvelle variable d'angle:

III.12 Bibliographie

- [1] J.P.bastos," Calcul des performances des machines à réluctance variable par méthode des éléments finis ", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1980.
- [2] Y. Alhassoun,"Etude et mise en œuvre de la machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [3] C. Glaize," Etude générale et optimisation des modes d'alimentation des machines à réluctance variable", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.
- [4] A. Levèque," Contribution à l'étude des machines à réluctance variable polydiscoides fonctionnement en génératrice ", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI,1983.
- [5] R.Goyet," Contribution à l'étude des machines à réluctance variable à disque imbriqué", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1981.
- [6] C. Rioux, "Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques", Revue de Physique Appliquée, n°15,1980, pp.1505-1515.
- [7] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, "Force Density Improvements from Increasing the Number of Airgap Surfaces in Synchronous Linear Actuators", IEE Proceedings, Electric power application Volume 150, Issue 01. January 2003, pp.106-120.
- [8] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, "Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [9] P.F.Desesquelles, J. Lucidarme, H.Ben Ahmed, "Expérimentation d'une machine couplé à très hautes performances massiques ", Colloque M.O.P.P, Lausanne (Suisse), Juillet 1990.
- [10] J.P.Bastos, R.Goyet, J.Lucidarme, "Performances intrinsèques des machines à réluctances variables à disques imbriqués", revue de physique appliquée n°1, janvier 1985, pp.45-53.
- [11] J.Nuta, " Contribution à l'étude des machines à réluctance variable à disque imbriqué", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1980.

- [12] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, " Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [13] J. Lucidarme, C. Rioux," Moteur à réluctance variable à topologie discoïde, Rapport technique réf .L/C.R.n° 80/310 ,1983.
- [14] K.Salamé," Etude des fonctionnements en moteur des machines à réluctance variable à disques imbriqués", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.
- [15] S.Allano ," Etude et réalisation de la commande d'un ensemble convertisseur-machine à réluctance variable", Thèse de docteur-ingénieur, Paris XI, 1982.
- [16] P.F.Desesquelles, " Contribution à l'étude de l'alimentation des machines à réluctance variable .Simulation numérique de trois ensembles machines-convertisseur", Thèse de docteur de 3^e cycle, Paris VI.
- [17] N.Chaiban," Etude et expérimentation d'ensemble convertisseur- machines à réluctance variable à disques imbriqués autopilotée", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1984.
- [18] L. Moreau," Modélisation, conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse", Thèse de docteur, Université de Nantes, 2005.
- [19] J.P . Martin," Contribution à l'alimentation en tension de machines synchrones à aimant permanent à nombre de phases élevé ", Thèse de docteur, INPL-Nancy, France, 2003.

CHAPITRE IV

ALIMENTATION DE LA MACHINE A
RELUCTANCE VARIABLE PAR LE
RESEAU

Chapitre IV : Alimentation de la Machine à réluctance variable par le réseau

Sommaire

IV.1 Introduction	70
IV.2 Notations	70
IV.3 Conditions d'extraction de la puissance	72
IV.4 Fonctionnement à une vitesse double de celle du synchronisme	73
IV.5 Fonctionnement à la vitesse de synchronisme	75
IV.5.1 Diagramme de Fresnel	75
IV.5.2 Extrémité du vecteur courant dans le plan de Fresnel	77
IV.6 Stabilité du point de fonctionnement	78
IV.6.1 Stabilité électrique du couplage	78
IV.6.2 Oscillations libres de la machine à réluctance variable	79
IV.6.2.1 Notations	79
IV.6.2.2 Période des oscillations	80
IV.6.2.3 Effet des oscillations sur le maintien du synchronisme	81
IV.7 Autres types d'alimentation	82
IV.8 Conclusion	84
IV.9 Bibliographie	85

Notations utilisées dans le chapitre

M.R.V	:	Machines à réluctance variable
p	:	Nombre de plots magnétiques
t	:	Temps
f	:	Fréquence
ω	:	Pulsation électrique
x	:	Angle électrique
θ, θ_m	:	Angles mécaniques
ψ, φ	:	Décalages internes
u	:	Tension instantanée
U_o	:	Tension moyenne
U	:	Tension efficace

Ω	:	Vitesse de rotation
ϕ	:	Flux magnétique
ϕ_o	:	Flux magnétique moyen
ϕ_c	:	Flux magnétique continu
R	:	Réductance
R_o	:	Réductance moyenne
r	:	Premier harmonique de la réductance
I	:	Courant efficace Alternatif
I_c	:	Courant d'excitation continu
L_o	:	Inductance moyenne
L	:	Inductance
ℓ	:	Premier harmonique de l'inductance
C_{moy}	:	Couple moyen
C_{syn}	:	Couple synchrone
P	:	Puissance fournie
P_m	:	Puissance mécanique
P_{max}	:	Puissance maximale
$c(t)$:	Couple instantané
J	:	Inertie du système tournant

IV.9 Bibliographie

- [1] R.Goyet," Contribution à l'étude des machines à réluctance variable à disque imbriqué", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1981.
- [2] Y. Alhassoun,"Etude et mise en œuvre de la machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [3] C. Glaize," Etude générale et optimisation des modes d'alimentation des machines à réluctance variable", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.
- [4] C. Rioux, "Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques", Revue de Physique Appliquée, n°15,1980, pp.1505-1515
- [5] J. Nuta, " Contribution à l'étude des machines à réluctance variable à disque imbriqué", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1980.
- [6] C. Rioux, "Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques", Revue de Physique Appliquée, n°15,1980, pp.1505-1515
- [7] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, "Force Density Improvements from Increasing the Number of Airgap Surfaces in Synchronous Linear Actuators", IEE Proceedings, Electric power application Volume 150, Issue 01. January 2003, pp.106-120.
- [8] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, "Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [9] P.F.Desesquelles, J. Lucidarme, H.Ben Ahmed, "Expérimentation d'une machine couplé à très hautes performances massiques ", Colloque M.O.P.P, Lausanne (Suisse), Juillet 1990.
- [10] J.P.Bastos, R.Goyet, J.Lucidarme, "Performances intrinsèques des machines à réluctances variables à disques imbriqués", revue de physique appliquée n°1, janvier 1985, pp.45-53.

- [11] P.F.Desesquelles, " Contribution à l'étude de l'alimentation des machines à réluctance variable .Simulation numérique de trois ensembles machines-convertisseur", Thèse de docteur de 3^e cycle, Paris VI.

- [12] J.Lucidarme, C.Rioux, J.Pouillange, " Moteur discoïde à réluctance variable et à aimants permanents. Des couples spécifiques élevés à faible vitesse ", RGE n°3, mars 1987, pp.43-52.
- [13] J. Lucidarme, C. Rioux," Moteur à réluctance variable à topologie discoïde, Rapport technique réf .L/C.R.n° 80/310 ,1983.
- [14] K.Salamé," Etude des fonctionnements en moteur des machines à réluctance variable à disques imbriqués", Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 1983.
- [15] S.Allano ," Etude et réalisation de la commande d'un ensemble convertisseur-machine à réluctance variable", Thèse de docteur-ingénieur, Paris XI, 1982.

CHAPITRE V

COMMANDE VECTORIELLE DE LA
MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE
POLYDISCOIDE

Chapitre V : Commande vectorielle de la machine à réluctance variable polydiscoide

Sommaire

V.1 Introduction	90
V.2 Modélisation de l'ensemble onduleur-machine en vue de la commande vectorielle	92
V.2.1 Machine à réluctance variable polyentrefer	92
V.2.2 Onduleur MLI	94
V.2.2.1 Alimentation	94
V.2.2.1.1 Onduleur de tension à MLI	95
V.3 La commande vectorielle de la MRV	95
V.3.1 Principe de la commande	95
V.3.2 Stratégie de la commande vectorielle	96
V.3.3 Structure de la commande	96
V.4 Simulation et interprétation	98
V.5 Conclusion	102
V.6 Bibliographie	103

Notations utilisées dans le chapitre

MRV	:	Machine à réluctance variable
$MRVP$:	Machine à réluctance variable
i_d	:	Courant direct
i_q	:	Courant en quadrature
v_a, v_b, v_c	:	Tensions des phases statoriques
i_a, i_b, i_c	:	Courants des phases statoriques
ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c	:	Flux totaux à travers les bobines statoriques
J	:	Moment d'inertie de l'ensemble machine et la charge
k_f	:	Coefficient de frottement de l'ensemble machine et la charge
R_s	:	Résistance des phases statoriques,
ϕ_d	:	Composante directe du flux

ϕ_q	:	Composante en quadrature du flux
θ	:	Angle électrique
v_d	:	Composante directe de la tension
v_q	:	Composante en quadrature de la tension
Ω	:	Vitesse angulaire du rotor
L_d	:	Inductance directe
L_q	:	Inductance en quadrature
T_e	:	Couple électromagnétique
T_{ch}	:	Couple de charge
ϕ_{PMT}	:	Flux d'un plot magnétique
T_{32}	:	Matrice de Concordia
T'_{32}	:	Matrice Transposé de Concordia
K_{ij}	:	Etat binaire de commutation de l'onduleur
[Mc]	:	Matrice de commutation

V.6 Bibliographie

- [1] E. Salame, G .Goyet, C. Lucidarne, G. Quichaud and C.Riox," Study of multidisc-reluctance motors under constant-voltage supply " Journal of Applied Physics III, 19 (7), 1984, pp.533-544.
- [2] C. Glaize, "Search forms optimal feeding of variable reluctance machines" Journal of Applied Physics III, 20 (11), 1985, pp. 779-794.
- [3] T.J.E. Miller, A. Hutton, C. Cossar and D.A. Staton, Design of a synchronous reluctance motor drive: IEEE Transaction on Industry Applications, 27(4), 1991, pp.741-749.
- [4] I.E. Chabu, J.R. Cardoso, V.C. Silva, S.I. Nabeta and A. Foggia," A new design technique based on a suitable choice of rotor geometrical parameters to maximize torque and power factor in synchronous reluctance motors" Part I, Theory. IEEE Transaction on Energy Conversion, 14 (3), 1999, pp. 605-609.
- [5] A. Tounzi, T.F. Meibody and F.M. Sargos, " Vector control of a smooth stator reluctance machine taking into account saturation and damping effects" Journal of Applied Physics III, France 7, 1997,pp. 909-926.
- [6] A.Boucetta," Vector control of a variable reluctance machine stator and rotor discs imbricates", American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (4), 2008, pp.260-265.
- [7] T. Lubin, H. Razik and A. Rezzoug," Magnetic saturation effects on the control a synchronous machine" IEEE Transaction on Energy Conversion, 17 (3), 2002 ,pp.356-362.
- [8] B.Nahid-Mobarakeh, F. Meibody-tabar and F.M. Sargos, " Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance" IEEE Transaction on Industry Applications, 40 (2), 2004, pp.457-471.
- [9] T. Rekioua,"Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents," Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, juillet 1991.

- [10] D. Arab Khaburi, "Contribution à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents sans capteur mécaniques," Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, 1998.
- [11] S. Afsharnia, "Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimants permanents : Identification des paramètres et minimisation des ondulations de couple," Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, avril 1995.
- [12] F. Bodin, "Commande des machines synchrones à aimants permanents et à forces contre électromotrices non sinusoïdales : minimisation des harmoniques de couple, commande sans capteur mécanique," Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, 1999.
- [13] B. Nahid Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, F.M. Sargos, "Commande vectorielle sans capteur mécanique des MSAP avec estimation de la résistance statorique," *JCGE '01*, Nancy, France, 2001.
- [14] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press, 2001.
- [15] E.T. Rakgati, M.J. Kamper, "Torque Performance of Optimally Designed Three and Five phase Synchronous Reluctance Machines with Two Rotor Structures", *IEEE Africon 2004*, Vol.1, 2004 ,pp.625-630.
- [16] Vagati A., Canova A., Guglielmi P., Pastorelli M.: "Design and control of high performance synchronous reluctance motor with multiple-flux-barrier rotor", *IPEC-Tokyo* , Shinjuku, Tokyo, Japan, vol. 1, April 3-7, 2000, pp. 627-636.
- [17] M. Rekik, "Commande et dimensionnement d'une machines à réluctance variable à double saillance fonctionnant en régime de conduction continue", Thèse de Doctorat de l'Université Paris sud-11, France, 2007.
- [18] G. Sturtzer, D. Flieller, J.P. Louis, "Extension of the Park's transformation applied to non-sinusoidal saturated synchronous motors", *EPE Journal 2002*, *European Power Electronics and Drives Journal*, Vol. 12, No.3, 2002, pp. 16-20.
- [19] G. Sturtzer, D. Flieller, J.P. Louis, "Mathematical and experimental method to obtain the inverse modeling of non sinusoidal and saturated synchronous reluctance motors", *Energy Conversion*, *IEEE Transaction on*, Vol. 18, No.4, Dec. 2003, pp. 494-500.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail décrit dans cette thèse a débuté par l'étude des différentes machines utilisées dans la conversion électrique, la comparaison des performances de ces machines entre-elles. La topologie des machines de types discoïdes est très utilisée dans les systèmes embarqués,

Il s'avère que les machines à réluctance variable polydiscoïdes ont l'avantage pour leur fort couple massique bien que certains problèmes mécaniques restent posés.

Pour leurs topologies, les M.R.V.P (sans excitation) sont aussi exposés, et ont aussi l'avantage d'avoir la vitesse de rotation liée au nombre de plots rotorique.

La description d'une M.R.V.P, et la mise en équation de ces caractéristiques. Nous avons pu obtenir ainsi deux positions extrêmes de la répartition des flux dans la machine.

Nous pouvons enfin constater à partir des équations présentées ici pour une seule phase la nécessité de diminuer les effets du couple pulsé par l'introduction de machines polyphasées.

Le problème abordé est relative à la structure à disques de ces machines, réside essentiellement dans la possibilité d'obtenir de grandes surfaces d'entrefer par la multiplication de disques.

Cet accroissement du nombre de disque doit s'effectuer en conservant aussi possible la forme des plots. Cela s'accompagne donc nécessairement d'une diminution de l'épaisseur des disques et d'une augmentation du nombre de plots, avec cette augmentation la fréquence augmente.

Pour l'alimentation de la machine à réluctance variable polydiscoïde dépend de la forme de courant et de la forme de la perméance. La forme du courant demandée, si elle maximise bien la puissance transformée par la machine, c'est la forme idéale pour de nombreuses applications. Aussi avons-nous été amenés à introduire divers critères d'optimisation de cette forme de courant. Les calculs effectués en valeurs instantanées; permettent de savoir quelle forme d'onde de courant doit générer le convertisseur pour maximiser le couple moyen pour un courant efficace ou de crête donné. L'alimentation par des courants rectangulaires (trapézoïdale) de la machine à réluctance variable polydiscoïde est retenue. En effet, les courants rectangulaires permettent de maximiser le couple et donc la puissance de la machine, ceci nous amènent à utiliser un convertisseur simple et robuste.

Les machines polydiscoïdes sont intéressantes sur le plan des performances (puissance massique), mais posent quelques problèmes mécaniques liés à la conception technologique du

rotor: effort axiaux important, contraintes mécaniques pulsées dues à la variation du couple engendré.

Bien qu'une alimentation électronique soit adaptée à ce type de machine, nous somme intéressés au cas d'une alimentation sinusoïdale par le réseau électrique est similaire à celle des machines synchrones.

La MRVP alimenté par le réseau, son couple est plus faible que pour des courants rectangulaires, par contre le couple est constant avec une alimentation triphasée. Pour un couple constant avec une inductance sinusoïdale ce qui est difficile à obtenir pour une machine réelle.

L'association Commande-Convertisseur- MRVP est possible, la machine est alimenté par un convertisseur MLI à courant sinusoïdale, la commande vectorielle des MRV nécessite une connaissance précise de la position du rotor qui assure l'autopilotage de la machine. Cette connaissance peut être obtenue directement par un capteur de position ou indirectement par un capteur de vitesse.

Ainsi, la méthode de découplage entre les courants direct et en quadrature s'avère très efficace et le comportement dynamique du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation est satisfaisant. Les résultats obtenus par simulation sous MATHLAB-SIMULINK sont tout aussi satisfaisants, ce qui permet d'envisager une simplification de la commande.

* * *

ANNEXES

ANNEXE 1

ELIMINATION DES HARMONIQUES DU COUPLE DANS LES MACHINES POLYPHASEES

Pour une machine monophasée, dans les conditions classiques d'utilisation, le couple peut s'écrire:

$$c(t) = C_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin(n\omega t + \phi_n)$$

ω : Est la fréquence électrique du courant d'alimentation.

On fabrique une machine polyphasée en associant q machines identiques géométriquement décalées d'un angle $2\pi / q$ et alimentées par des ondes de courant décalées temporellement de $1 / q$ période, c'est-à-dire d'un temps $2\pi / \omega$. Pour la machines numéro i ($i \in \{1, 2, \dots, q\}$), le couple s'écrit:

$$c_i(t) = C_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin \left[n\omega \left(t - \frac{2\pi i}{q\omega} \right) + \psi_n \right]$$

$$c_i(t) = C_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin \left[n \left(\omega t - \frac{2\pi i}{q} \right) + \psi_n \right]$$

Pour la machine q-phasée, le couple total s'écrit:

$$c_t(t) = q \cdot C_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left\{ \sum_{i=1}^q \sin \left[n \left(\omega t - \frac{2\pi i}{q} \right) + \psi_n \right] \right\}$$

Il faut maintenant étudier le terme:

$$\sum_{i=1}^q \sin \left[n \left(\omega t - \frac{2\pi i}{q} \right) + \psi_n \right]$$

On peut le développer en deux termes:

$$\sin(n\omega t + \psi_n) \cdot \sum_{i=1}^q \cos \left(\frac{2\pi \cdot i \cdot n}{q} \right) - \cos(n\omega t + \psi_n) \cdot \sum_{i=1}^q \sin \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{q}$$

La somme des sinus est toujours nulle. Celle en cosinus est nulle pour $n \neq k \cdot q$ ($\{1, 2, \dots, \infty\}$) et vaut $n = k \cdot q$.

En définitive, le couple de la machine polyphasée s'écrit:

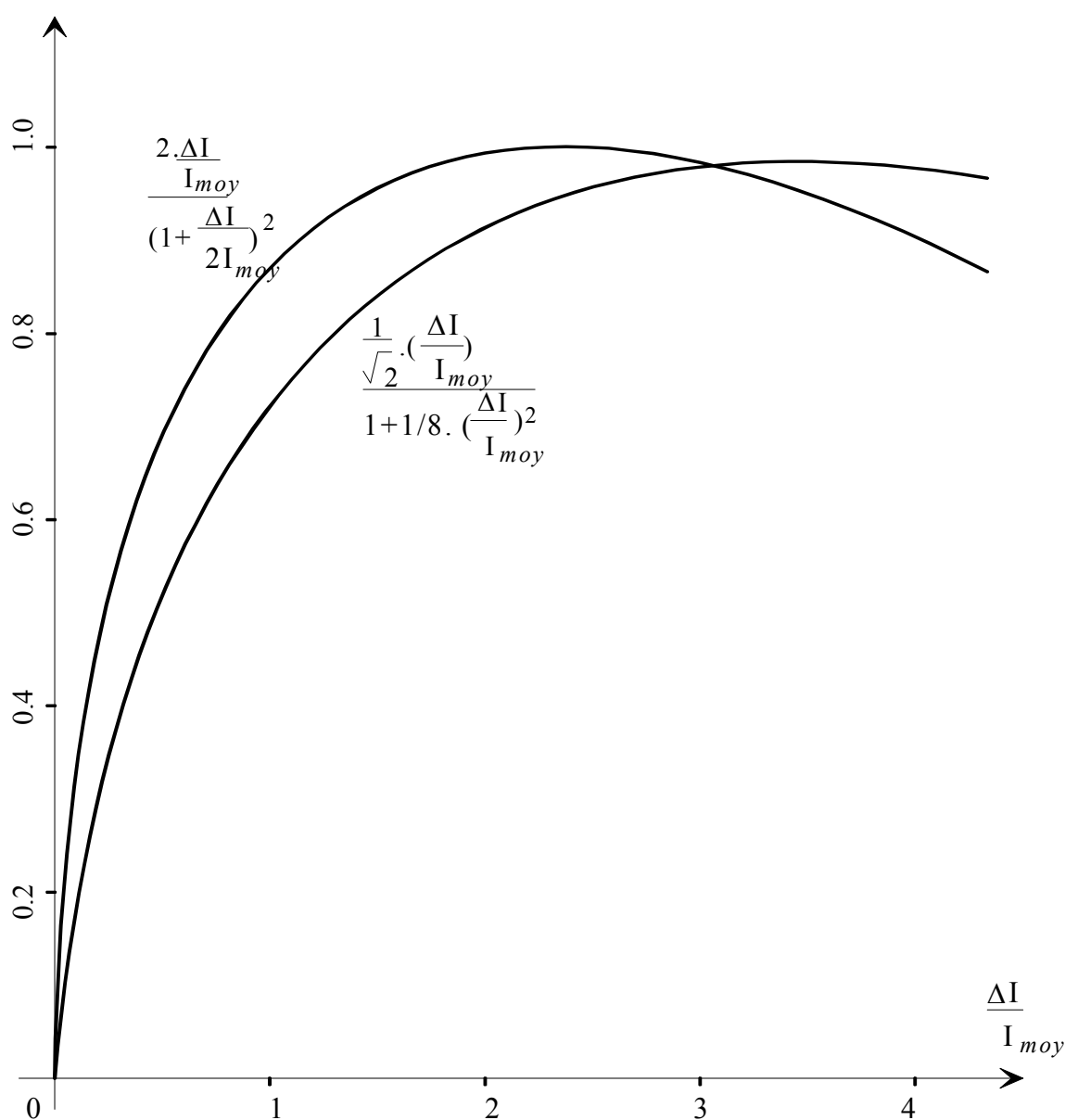
$$c_t(t) = q \cdot \left[C_{moy} + \sum_k C_{kq} \sin(kq\omega t + \psi_{kq}) \right]$$

Par association de q machines monophasées, on élimine tout les harmoniques de couple de rang non multiple de q . En particulier, on élimine ainsi tous les harmoniques de rang inférieur à q . le premier harmonique de couple présent est donc de rang q . son taux relatif à la valeur moyenne est inchangé, ainsi d'ailleurs que le taux de tous les harmoniques restant.

ANNEXE 2

FONCTIONS UTILISEES DANS LES CALCULS DE COUPLE EN LINEAIRE

Les figures A.1, A.2, et A.3 représentent les tracés des fonctions de $\frac{\Delta I}{I_{moy}}$ et de $\Delta\theta$ utilisées dans le calcul du chapitre III (calcul des couples moyens pour diverses forme d'onde de courant et de perméance). Ils donnent la valeur de la fonction pour une abscisse donnée et surtout permettent la comparaison des fonctions entre elles.

Figure A.1: Fonction de $\Delta I / I_{moy}$

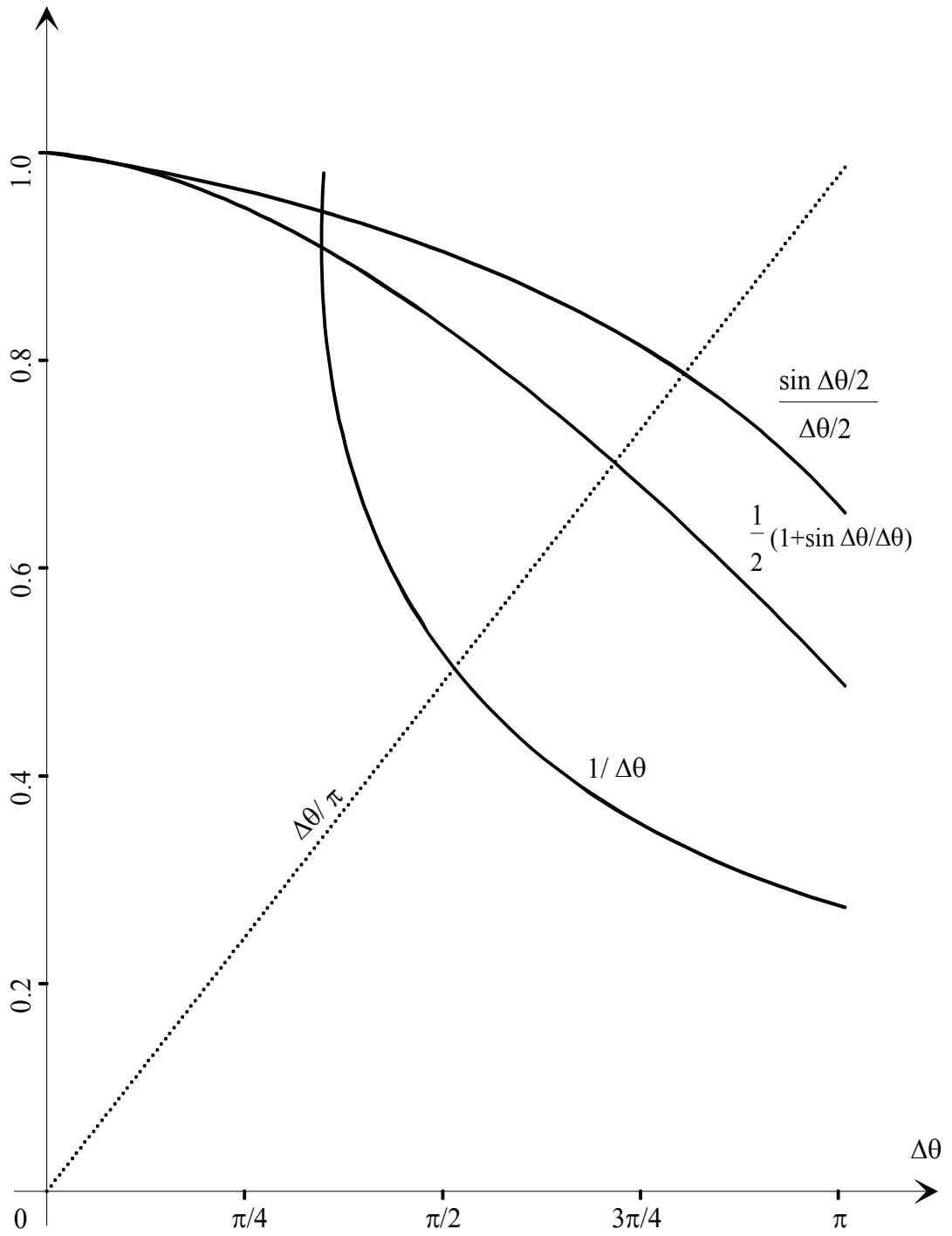


Figure A.2: Fonction de $\Delta\theta$ pour $(0 \leq \Delta\theta \leq \pi)$

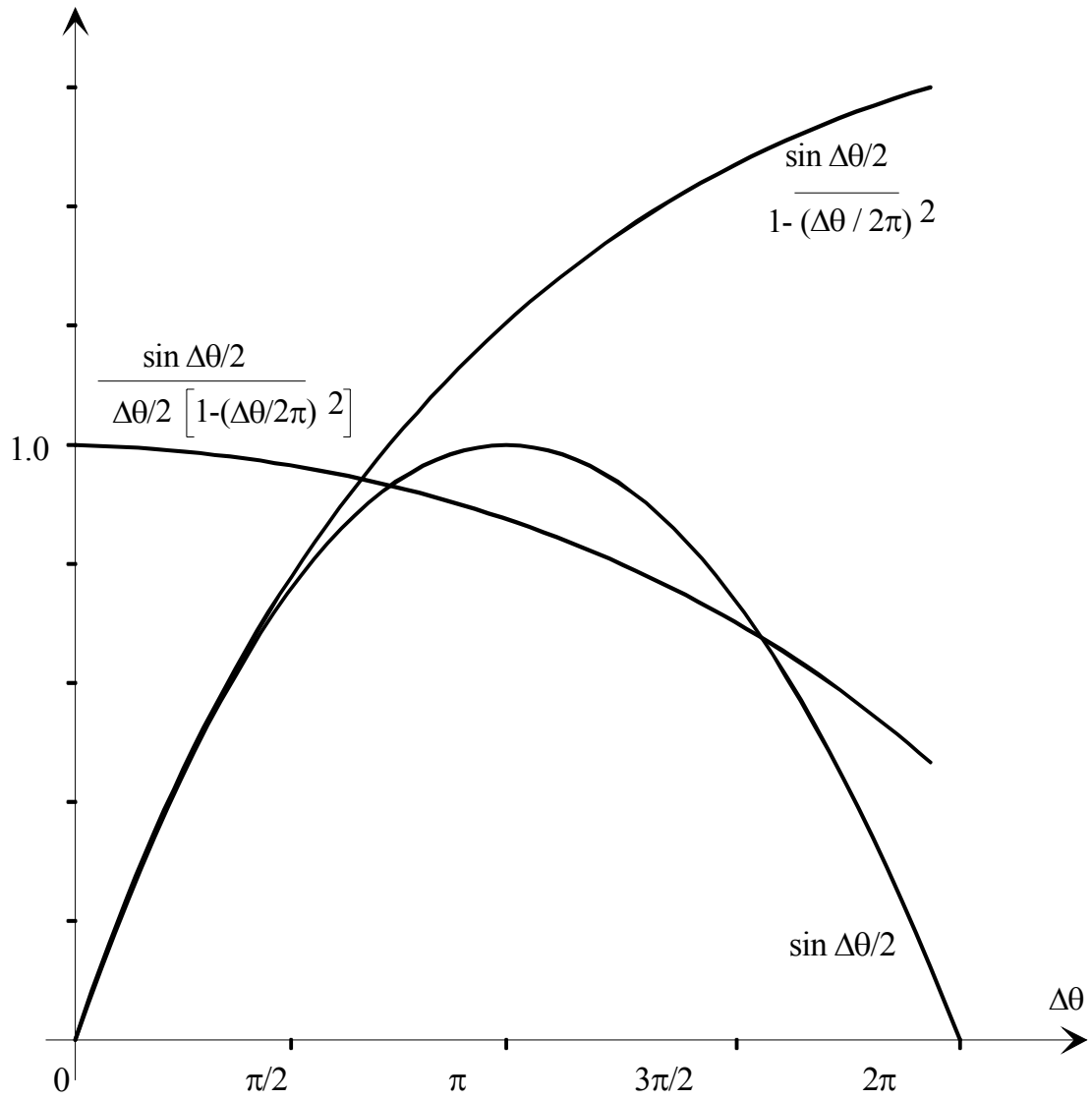


Figure A.3: Fonction de $\Delta\theta$ pour $(0 \leq \Delta\theta \leq 2\pi)$

ANNEXE 3***PARAMETRES DE LA MACHINE SIMULEE***

Inductance sur l'axe d, $L_d = 12.3$ [mH]

Inductance sur l'axe q, $L_q = 5.17$ [mH]

Résistance du stator, $R_s = 25$ [m Ω]

Tension de sortie de l'onduleur, $v = 380$ [Volts]

Moment d'inertie, $J = 3.61$ [kg.m²]

Vitesse de rotation de référence, $\Omega_{ref} = 3000$ [T.p.m]

Courant direct de référence, $i_{dref} = 200$ [A]

Courant nominal $I_n = 218$ [A]

Nombre de pôles = 2