

50376
1994
271

N° D'ORDRE : 1413

6102587

50376
1994
271

THÈSE

(NOUVEAU RÉGIME : ARRÊTÉ DU 30 MARS 1992)

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

Ali ZOUAIDI

INGÉNIEUR EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

DE L'ÉCOLE NATIONALE DES INGÉNIEURS DE MONASTIR (ENIM) - TUNISIE

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME EXPERT POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET L'ANALYSE DE STABILITÉ DES MACHINES À RÉLUCTANCE VARIABLE

SOUTENUE LE 21 NOVEMBRE 1994 DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

MM.	G. SÉGUIER	PRÉSIDENT
	F. M. SARGOS	RAPPORTEUR
	J. LESENNE	RAPPORTEUR
	H. SCHOORENS	DIRECTEUR DE THÈSE
	C. ROMBAUT	EXAMINATEUR
	S. TOUMIA	EXAMINATEUR

*À mes Parents, pour leurs Sacrifices et leurs Encouragements
À mes Frères et plus particulièrement Khaled, à mes Ami(e)s.*

AVANT - PROPOS

Le travail, présenté dans ce mémoire, a été effectué au Département Énergétique Industrielle de l'École des Mines de Douai. Je tiens à remercier Monsieur M. COTTE, Directeur et Monsieur D. BOULNOIS, Directeur Adjoint, qui m'ont accueilli et fourni les moyens pour mener à bien cette étude.

Je tiens à remercier vivement Monsieur le Professeur H. SCHOORENS, Chef du Département Énergétique Industrielle, de m'avoir accueilli et assuré la direction scientifique de cette thèse avec un esprit particulièrement libéral. Je voudrais lui exprimer ici ma profonde gratitude pour l'intérêt, les conseils, le soutien et la confiance qu'il m'a prodigués.

Je voudrais remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur Émérite G. SÉGUIER de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP), de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) et d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Je dois à Monsieur le Professeur J. LESENNE, Directeur de l'IUT de Béthune, une sincère gratitude pour avoir accepté, malgré ses nombreuses charges, d'être rapporteur de ce travail.

Je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur le Professeur F. M SARGOS à l'ENSEM de l'INPL de Nancy, je tiens à

l'assurer de toute ma reconnaissance pour m'avoir permis de mener à bien des expériences dans son laboratoire et d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être l'un des rapporteurs.

Que Monsieur S. TOUMIA, Chef du Département Génie Électrique de l'ENIM, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour avoir entrepris le voyage de MONASTIR afin de participer au jury, j'en suis très honoré.

Je voudrais remercier chaleureusement Monsieur le Professeur C. ROMBAUT de l'École Centrale de Lille d'avoir accepté la charge de participer au jury.

C'est un devoir certainement agréable pour moi d'exprimer mes plus vifs remerciements à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu entretenir des discussions et échanger des idées, qui ont fait avancer mon travail. Il s'agit particulièrement de Monsieur J. L. CORDONNIER de l'École des Mines de Douai, et de Messieurs F. MEIBODY TABAR et F. TISSON respectivement Maître de Conférence et Technicien Supérieur à l'INPL de Nancy.

Enfin, je ne saurais commencer ce mémoire sans souligner la cordialité, les encouragements et la gentillesse de mes collègues et des membres du Département Énergétique Industrielle de l'École des Mines de Douai qui m'ont prodigué aide et conseils.

Que tous ceux que j'aurais pu oublier veuillent bien m'excuser.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
-----------------------------	---

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES EXPERTS EN INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

1.1 - Introduction	7
1.2 - Structure Globale et Fonctionnalités des Systèmes Experts.....	8
1.3 - Acquisition des Connaissances	10
1.3.1 - Problèmes Posés par l'Acquisition des Connaissances.....	11
1.3.2 - Méthodologie Générale d'Acquisition des Connaissances	11
1.3.3 - Analyse des Connaissances.....	13
1.4. - Représentation de Connaissances dans les Systèmes Experts	14
1.5 - Systèmes Experts en Ingénierie Électrique.....	16
1.5.1 - Avantages de l'Approche Système Expert.....	16
1.5.2 - Exemples de Systèmes Expert en Ingénierie Électrique	17
1.6 - Conclusion	20

CHAPITRE 2 : LES MACHINES À RÉLUCTANCE VARIABLE

2.1 - Introduction.....	23
2.2 - Principe de la Machine à Réductance Variable	23
2.3 - Machine Polyphasée à Réductance Pure (Non Excitée).....	25
2.3.1 - Machine à Stator Lisse	25
2.3.2 - Machine à Double Denture	27
2.4 - Énergie dans l'Entrefer	28
2.4.1 - Densité de Courant Superficielle.....	29
2.4.2 - Potentiel Vecteur.....	30
2.4.3 - Conversion Continue de l'Énergie.....	30

2.5 - Classement des MRV	31
2.5.1 - Machine à Une Nappe de Courant	31
2.5.2 - Machine à Deux Nappes de Courant.....	32
2.5.2.1 - Machine à Deux Nappes Indépendantes	33
2.5.2.2 - Machine à Deux Nappes Proportionnelles en Module.....	34
2.5.3 - Machine à Stator Lisse	34
2.5.4 - Machine à Excitation Homopolaire	34
2.6 - Modélisation de la MRV à Stator Lisse	36
2.6.1 - Description de la Machine	37
2.6.2 - Équations de Fonctionnement.....	37
2.7 - Modélisation de la MRV à Double Denture	44
2.7.1 - Description de la Machine	44
2.7.2 - Équations Générales.....	44
2.8 - Évaluation des Performances des MRV en Régime Établi.....	46
2.8.1 - Analyse du Fonctionnement par le Diagramme Vectoriel	46
2.8.1.1 - Expressions des Courants	47
2.8.1.2 - Puissances d'Entrée et de Sortie et Couple.....	47
2.8.1.3 - Angle Interne de Charge à Vide.....	49
2.8.1.4 - Angle Interne de Décrochage	49
2.8.1.5 - Domaine de Fonctionnement de la MRV à Stator Lisse.....	50
2.8.1.6 - Couple de Décrochage.....	51
2.8.1.7 - Courant à Vide	52
2.8.1.8 - Courant de Décrochage	52
2.8.2 - Analyse par le Diagramme de Cercle.....	52
2.8.2.1 - Écriture Complexe des Équations - Diagramme de Cercle.....	53
2.8.2.2 - Prise en Compte des Pertes Fer et Mécaniques.....	56
2.8.2.3 - Prise en Compte de la Résistance Statorique	57
2.9 - Étude de la Stabilité des MRV par la Méthode Directe de LJAPUNOV	60
2.9.1 - Méthode de LJAPUNOV pour l'Étude de la Stabilité Globale.....	60
2.9.2 - Méthode Générale de Construction de la Fonction de LJAPUNOV	62
2.9.3 - Application aux MRV	64
2.9.3.1 - Systèmes de Valeurs Réduites.....	64
2.9.3.2 - Équation de Mouvement de la MRV en Grandeurs Réduites	67
2.10 - Conclusion	75

CHAPITRE 3 : DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME EXPERT

3.1 - Introduction.....	77
3.2 - Acquisition des Connaissances.....	78
3.2.1 - Processus d'Acquisition des Connaissances.....	80
3.2.2 - Rôle du Cogniticien.....	80
3.2.3 - Méthodologie de Transfert.....	81
3.2.3.1 - Étape de Mise en Œuvre.....	82
3.2.3.2 - Étape d'Observation et d'Apprentissage.....	82
3.2.3.3 - Étape de Dialogue.....	83
3.2.4 - Difficultés de Transfert.....	83
3.3 - Représentation des Connaissances d'Expertise.....	83
3.3.1 - Calcul Logique.....	85
3.3.1.1 - Calcul Propositionnel.....	85
3.3.1.2 - Calcul des Prédicats.....	86
3.3.2 - Formalisme de Règles de Production.....	87
3.3.2.1 - Présentation Générale.....	89
3.3.2.2 - Moteurs d'Inférence Associés.....	90
3.3.3 - Réseaux Sémantiques.....	90
3.3.4 - Cadres Sémantiques ou "Frames".....	92
3.3.5 - Représentations Orientées Objets.....	94
3.4 - Outils d'Implémentation.....	95
3.5 - Objectifs du Projet Pilote Système Expert pour les MRV.....	97
3.6 - Choix de l'Outil de Développement du Système Expert SEMAREV.....	98
3.6.1 - Choix du Langage PROLOG.....	100
3.6.2 - PROLOG : Outil de Développement de Systèmes Experts.....	102
3.6.2.1 - Avantages de PROLOG.....	102
3.6.2.2.- Problèmes Posés par PROLOG.....	103
3.6.2.3 - Atouts de PROLOG vis à vis des Autres Langages.....	104
3.7 - Développement du Système Expert SEMAREV.....	104
3.7.1 - Mise en Œuvre de la Base de Données des MRV.....	105
3.7.2 - Représentation des Hypothèses Relatives aux MRV.....	106
3.7.3 - Représentation des Modèles de la MRV.....	106
3.8 - Architecture et Fonctionnalités du Système Expert SEMAREV.....	107
3.8.1 - Fonctions d'Explication.....	108
3.8.2 - Fonctions de l'Interface.....	109
3.8.3 - Moteur d'Inférence.....	109
3.8.4 - Interface Multi-Fenêtres.....	110
3.9 - Conclusion.....	111

CHAPITRE 4 : ÉVALUATION ET VALIDATION DU SYSTÈME EXPERT

4.1 - Introduction.....	113
4.2 - Évaluation de la Faisabilité du Prototype	113
4.2.1 - Objectifs du Système Expert SEMAREV	113
4.2.2 - Plan de Validation.....	114
4.3 - Validation Expérimentale du Système Expert SEMAREV.....	115
4.3.1 - Identification Expérimentale des Paramètres d'une MRV à Stator Lisse.....	115
4.3.2.1 - Méthode d'Identification	116
4.3.2.2 - Exploitation des Résultats	120
4.3.3 - Mesure des Pertes Fer et Mécaniques	122
4.3.4 - Évaluation des Performances de la MRV et Influence des Paramètres.....	123
4.3.4.1 - Puissance de Sortie et Facteur de Puissance.....	123
4.3.4.2 - Courant Statorique et Rendement.....	127
4.3.4.3 - Diagramme du Cercle de la Machine	129
4.3.4.4 - Évaluation des Performances et Utilisation des Hypothèses.....	131
4.3.5 - Analyse de la Stabilité de la MRV et Influence de ses Paramètres.....	133
4.3.5.1 - Analyse de la Stabilité par la Méthode Directe de LJAPUNOV	134
4.3.5.2 - Effet des Paramètres sur la Stabilité Transitoire de la MRV.....	136
4.4 - Conclusion	147
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	149
ANNEXE 1 : PANORAMA DES GÉNÉRATEURS DE SYSTÈMES EXPERTS	152
ANNEXE 2 : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE LA FONCTION DE LJAPUNOV	159
ANNEXE 3 : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DE MOUVEMENT DE LA MRV..	164
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	169

NOTATIONS EMPLOYÉES

<i>Grandeur</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
V, E	Tension d'Alimentation par Phase	V
p	Nombre de Paires de Pôles	-
m	Nombre de Phases	-
I _d	Courant Direct	A
I _q	Courant en Quadrature	A
I	Courant par Phase	A
I _{nl}	Courant à Vide	A
I _{po}	Courant de Décrochage	A
J	Densité Superficielle du courant	A/m ²
f	Fréquence de la Tension d'Alimentation	Hz
p _f , W ₀	Pertes Fer (Hystérisis, Courant de Foucault)	W
ω	Fréquence Angulaire de l'Alimentation	rad/s
R _S	Résistance Statorique	Ω
X _d	Réactance Directe	Ω
X _q	Réactance en Quadrature	Ω
P _{in}	Puissance d'Entrée	W
P _{out}	Puissance de Sortie	W
t	temps	s
δ	Angle de Charge Interne	rad
θ	Position Instantanée du Rotor	rad
Γ _e	Couple Électromagnétique	N.m
Γ _{nl}	Couple Électromagnétique à Vide	N.m
Γ _{po}	Couple Électromagnétique de Décrochage	N.m
P	Puissance Active Externe	W
Q	Puissance Réactive Externe	VAR
p _j	Pertes Joules	W
P _{méc}	Pertes Mécaniques	W

η	Rendement	-
$\cos \varphi$	Facteur de Puissance	-
\vec{A}	Potentiel Vecteur	-
A	Composante Axiale du Potentiel Vecteur	-
S	Puissance Apparente	V.A
φ	Déphasage entre le courant et la Tension	rad
Ω	Vitesse de Rotation mécanique	rad/s
N	Vitesse de Rotation mécanique	tr/min
N_S	Nombre de dents au Stator	-
N_R	Nombre de dents au Rotor	-
W	Coénergie d'Entrefer	J
P_j	Constante d'Inertie de la Machine	p.u.
P_d	Constante d'Amortissement de la Machine	p.u.
P_l	Charge mécanique	p.u.
x_1, x_2	Variables d'État	-
V(x)	Fonction de LJAPUNOV	-

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ordinateurs initialement conçus pour traiter des informations numériques furent néanmoins rapidement utilisés pour traiter de l'information symbolique. Depuis longtemps déjà, il est convenu de considérer deux approches de l'informatique : l'une dite Algorithmique ou Impérative et l'autre que l'on appelle Intelligence Artificielle (I.A.).

L'intelligence artificielle est née dans les années cinquante et connaît depuis une vingtaine d'années un essor considérable. Les chercheurs dans ce domaine se sont fixé pour objectif d'analyser les comportements intelligents de l'homme, en particulier dans les domaines de la perception, de la compréhension, de la décision et de la conception, afin de les reproduire sur un ordinateur adoptant un comportement très proche du comportement humain. Ces travaux ont entraîné une modification dans la conception des méthodes de résolution de bon nombre de problèmes.

Elle propose donc deux voies de recherches : comprendre l'homme et simuler son activité. La compréhension est assurément la plus ambitieuse et la plus délicate ; il nécessite l'étude de l'intelligence et concerne des domaines tels que la psychologie, la physiologie, la linguistique, la logique, la neurophysiologie et la neurobiologie. Quant au deuxième objectif, qui nous concerne plus particulièrement, il consiste à étudier les moyens informatiques nécessaires à la simulation du comportement humain. Il s'agit de reproduire des attitudes et des raisonnements jugés intelligents tout en restant conscient de certaines limites [BRUNET 88]. Il semble aujourd'hui acquis que l'idée de "machine universelle intelligente" soit abandonnée, et que la machine ne disposera jamais de certaines caractéristiques propres au cerveau humain telles que sa surprenante tolérance aux erreurs, sa prise en compte de l'imprécis, son pouvoir d'adaptation et d'anticipation et ses capacités d'auto-organisation créative.

Ainsi, on peut définir l'intelligence artificielle comme la solution informatique à utiliser quand l'algorithmique classique ne suffit pas pour résoudre un problème. En fait, l'intelligence artificielle est une discipline dont le but principal est de construire des systèmes dits intelligents, à savoir ceux qui sont capables de comprendre ou tout au moins de modéliser une situation donnée. Un système de ce type doit être capable de s'adapter à une situation, de faire des analogies et des projections d'idées. Tout cela requiert de souplesse et facilité au niveau de la description des objets ou des événements et des différentes stratégies à appliquer [LECLERCQ 90]. D'un point de vue informatique, les travaux liés à l'intelligence artificielle tentent de donner à l'ordinateur une possibilité de raisonner sur des données de type symbolique.

On assiste en outre, au développement de machines dites symboliques, de langages de haut niveau permettant de manipuler des expressions symboliques (PROLOG, LISP), ou plus récemment SMALLTALK.

Les systèmes experts, conçus à partir des techniques de l'intelligence artificielle, mettent en œuvre des raisonnements heuristiques. Les heuristiques apparaissent comme des parcelles de connaissance capables de suggérer des actions plausibles à suivre et d'autres moins intéressantes à éviter en face de situations nouvelles. À la différence des programmes informatiques classiques, qui intègrent les outils de résolution et les données dans une même entité, les systèmes experts séparent les connaissances de leurs méthodes d'exploitation ou d'utilisation. Une des difficultés de leur mise en œuvre réside dans la caractérisation de la démarche cognitive ; le but de cette démarche consiste à définir la conduite individuelle adaptée à l'environnement à partir d'une situation donnée.

Ces systèmes experts se placent sur un plan différent des systèmes informatiques traditionnels. Ils sont utilisés dans des domaines où l'homme manipule des informations factuelles, des données partielles et des stratégies de raisonnement. Ils sont des programmes visant à simuler, le plus scrupuleusement possible, le comportement, la démarche, le cheminement de la pensée et la performance d'un expert humain dans un domaine bien limité en traitant la masse de connaissances de ce domaine. Ils peuvent tenir des raisonnements intelligents et de façon intelligible, c'est-à-dire en sachant expliquer et justifier leurs raisonnements. Conçus pour l'homme, pour lui être utiles, ces systèmes peuvent dialoguer, en langage simple sinon naturel, avec le spécialiste afin de faciliter le transfert de connaissances, gage de viabilité du système. Inversement, le système doit être compris par l'utilisateur et doit pouvoir justifier ses actions, gage d'acceptabilité. Ceci implique inévitablement que les connaissances utilisées soient explicites, déclaratives et bien séparées de leurs procédures d'utilisation [LAURIÈRE 82]. Cette séparation permet au système de s'enrichir par déclarations successives et désordonnées de connaissances sans modification du programme qui structure et organise par lui-même ces mises à jour.

Un système expert doit réagir devant une situation particulière, sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir a priori toutes les successions possibles de situation. Par exemple un médecin qui doit effectuer un diagnostic travaille à partir d'une description seulement partielle de la situation. Il tente de déduire tout ce qui est possible en élaborant des hypothèses et recherche d'autres informations lui permettant d'établir son diagnostic. Par nature même, les systèmes traditionnels, de conception algorithmique, ne peuvent résoudre de tels problèmes.

Différents modes de représentation de connaissances sont utilisés, selon la complexité des connaissances à manipuler, dans les systèmes experts : règles de productions, réseaux sémantiques et représentations orientées objets. Cependant, quel que soit le formalisme employé, l'architecture d'un système expert comprend toujours au moins les quatre structures suivantes :

- ☆ une base de connaissance ou de règles qui est une mémoire à long terme où sont stockées les connaissances du domaine, elle correspond à la modélisation du cheminement de la pensée de l'expert humain,
- ☆ un moteur d'inférences, appelé aussi machine de déductions, qui exploite ses connaissances et permet ainsi la simulation de la stratégie de l'expert, humain pour fournir une solution au problème posé,
- ☆ une base de faits ou un espace de travail qui est une mémoire à court terme contenant la description du problème à traiter et la trace du raisonnement,
- ☆ une interface utilisateur permettant la communication homme-machine.

Cette structuration, en quatre parties indépendantes confère aux systèmes experts deux principales caractéristiques qui, par ailleurs, sont à la base de leurs succès :

- une capacité d'explication de leur comportement (les choix effectués et les connaissances utilisées),
- une possibilité de modifier les connaissances sans avoir à récrire ou reprogrammer le système.

La constitution de la base de connaissance conditionne fortement la réussite d'un système expert. Cette condition suppose, d'une part la participation au projet des spécialistes du domaine étudié en explicitant au maximum leur savoir-faire et d'autre part, la nécessité d'une étape de formalisation de ces connaissances ainsi que le choix d'une structure de représentation compréhensible par la machine. Ainsi, le concept de connaissances apparaît comme le noyau central autour duquel se développent les systèmes experts et plus généralement L'intelligence artificielle. Il semble alors naturel que le concepteur de systèmes experts se trouve confronté à certains problèmes strictement liés à ce concept de connaissances.

Les principaux domaines d'application de l'intelligence artificielle sont la démonstration automatique de théorèmes et les jeux, la compréhension du langage naturel, la reconnaissance de la parole, le traitement d'images, la robotique, l'enseignement assisté par ordinateur et les systèmes experts.

Plusieurs systèmes experts ont été réalisées dans différents domaines et ont fait leurs preuves : MYCIN en 1976 pour le diagnostic de maladies bactériennes du sang, PROSPECTOR en 1978 pour la prospection minière, R1 en 1980 pour configurer les ordinateurs VAX, DIABETO 1984 pour le diagnostic et le traitement du diabète, font partie des plus connus. Le domaine du Génie Électrique a profité de la puissance de l'approche

système expert dans diverses applications, on trouve essentiellement le système expert ASDEP pour la conception des réseaux électriques d'une centrale de production d'énergie électrique, ESIMT permettant le diagnostic en ligne des machines d'induction, DAMOCLES pour la conception des machines asynchrones.

Ce mémoire traite de l'élaboration et la mise en œuvre d'un système expert baptisé SEMAREV permettant l'évaluation des performances et l'analyse de stabilité d'une Machine à Réductance Variable (MRV) à partir des paramètres, dans le modèle de PARK, de la machine étudiée et en tenant compte des hypothèses validées par l'utilisateur concernant cette même machine (hypothèses heuristiques, ou simplificatrices). Les motivations qui ont poussé à réaliser ce produit pilote sont diverses. On peut notamment citer l'absence d'un outil qui réunisse toutes les connaissances et les hypothèses nécessaires à évaluer les performances ou à prédire la stabilité d'une MRV, les nombreuses difficultés d'une approche algorithmique classique, la souplesse de mises à jour et d'extensions des connaissances dans un outil de type système expert et la faculté que possède un tel outil permettant de fournir, avec une facilité extrême, les justifications de son raisonnement.

La décision d'utiliser PROLOG s'explique facilement quand on connaît les possibilités offertes par ce langage et son adaptabilité aux systèmes experts [DELAHAYE 88], en particulier pour les problèmes de représentations et d'utilisation de bases de connaissances dans un système expert [FUKUI 86]. Le présent mémoire a été structuré en quatre chapitres.

Ainsi, au premier chapitre, on présentera l'état de l'art en matière des systèmes experts appliqués aux domaines de l'ingénierie électrique.

Le deuxième chapitre a été consacré, d'une part, à la présentation des différentes structures à réductances variables, à leurs modélisations linéaires et leurs études en régimes stationnaires permettant l'évaluation de leurs performances intrinsèques. D'autre part on a exposé le problème de stabilité des MRV et la méthode qui permet de l'analyser, en l'occurrence la méthode directe de LJAPUNOV.

Au troisième chapitre, on décrira la procédure d'implémentation du modèle d'évaluation de performances et d'analyse de stabilité des MRV à l'aide de l'outil PROLOG. Parallèlement, on évoquera la représentation des connaissances relatives aux MRV et la mise en œuvre de leur mécanisme d'exploitation ainsi que l'architecture du prototype élaboré.

Enfin, dans le dernier chapitre, on présentera la mise en œuvre de l'évaluation et de la validation du système expert. La puissance et l'utilité de l'outil ainsi réalisé a été mise en évidence par comparaison de ses résultats avec ceux issus des essais expérimentaux lors de l'évaluation des performances et de l'étude de stabilité d'une machine à réductance variable.

CHAPITRE 1 :

ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES EXPERTS EN INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

1.1 - INTRODUCTION

Le concept de système expert est directement issu des travaux réalisés en intelligence artificielle depuis de nombreuses années. À l'origine, l'objectif des chercheurs était de doter les ordinateurs de mécanismes logiques leur permettant de résoudre des problèmes très généraux comme la vision, la démonstration de théorèmes, la génération de plan d'action en robotique et le jeu d'échecs.

Très rapidement, les chercheurs se sont aperçus que la réalisation de programmes universels permettant de traiter une grande variété de problèmes nécessitait la mise en œuvre d'un immense volume de connaissances. En fait la plus grande partie de ces connaissances traduit notre faculté de perception, elles sont dites de sens commun ou de bon sens. Pour simplifier le problème, les objectifs de l'intelligence artificielle ont été décomposés en domaines d'application très spécialisés comme la vision, la robotique et les systèmes experts.

L'objectif d'un système expert est de remplir une tâche dite "intelligente" bien précise en utilisant des connaissances spécialisées. Ces connaissances intègrent et synthétisent tout l'acquis scientifique, technique et de sens commun nécessaire à la résolution d'un problème. Un système expert raisonne à un niveau d'abstraction plus grand et utilise pour cela un volume minimum de connaissances. Pour mettre en œuvre les connaissances, le système expert dispose généralement de plusieurs stratégies logiques qui simulent le raisonnement humain (raisonnement inductif ou déductif).

Un modèle d'évaluation des performances et de stabilité des machines à réluctance variable, pour être fidèle et efficace, doit permettre de manipuler des informations tant numériques que symboliques. Il doit intégrer les connaissances mathématiques et physiques de ce domaine particulier, mais aussi les diverses heuristiques ou connaissances empiriques issues de l'expérience des experts humains en réluctance variable.

La mise en œuvre d'une aussi grande variété d'informations nécessite l'utilisation *d'outils adaptés souples et performants*. Les techniques utilisées dans les systèmes experts semblent présenter toutes les qualités requises pour notre problème.

Nous décrivons succinctement, dans une première partie de ce chapitre, les éléments de bases nécessaires à la programmation et à la mise en œuvre de ces nouvelles techniques. Dans la seconde partie, on présentera l'état de l'art des systèmes experts appliqués en ingénierie électrique et on donnera des exemples de systèmes fonctionnels.

1.2 - STRUCTURE GLOBALE ET FONCTIONNALITÉS DES SYSTÈMES EXPERTS

Dans un programme classique, les données et les instructions sont réunies au sein de la même entité. Il résulte de cette structure l'impossibilité de faire la distinction entre les connaissances nécessaires à la résolution du problème, la stratégie de résolution et la mise en œuvre informatique des connaissances et de la stratégie. Tout est inscrit dans les instructions du programme de manière permanente. L'outil obtenu est efficace mais figé : pour faire évoluer les aptitudes du programme il faut modifier ou ajouter des instructions.

L'idée fondamentale mise en œuvre dans les systèmes experts est qu'il faut dissocier les données et les connaissances de la manière d'utilisation et d'exploitation de ces données et la stratégie d'enchaînement des connaissances.

La structure qui en découle est représentée sur la Fig. 1.1 et elle est constituée des trois éléments suivants :

- les données sont stockées au fur et à mesure de leur apparition dans une **base de faits**. Un fait est un terme très général qui représente une assertion pertinente pour le problème. Par exemple : *le temps est ensoleillé et T=30 °C* sont des faits,
- la connaissance relative à l'utilisation des données est éclatée sous la forme de modules déclaratifs indépendants appelés **règles**. Celles-ci sont stockées à part dans une base de règles. Les règles expriment généralement des relations logiques entre les faits. On utilise souvent le format des **règles de production**, par exemple :
Si le temps est beau Alors je ne prends pas mon parapluie,
- la gestion des faits et des règles est assurée par un superviseur dont le rôle est d'enchaîner les règles afin de déduire de nouveaux faits à partir de faits initiaux. Les faits déduits sont alors rajoutés dans la base de faits. Ce programme très général est appelé **moteur d'inférences**. Il constitue la partie statique du système expert (au sens où son implémentation ne peut être modifiée). Toutefois celui-ci peut souvent être paramétré en fonction de la stratégie d'enchaînement des règles désirée.

Deux stratégies standards sont souvent disponibles :

- la stratégie inductive ou "chaînage" avant qui à partir de la règle "*Si le temps est beau Alors je ne prends pas mon parapluie*" permet de déduire le fait "*je ne prends pas mon parapluie*" du fait "*le temps est beau*";

- la stratégie déductive ou “chaînage arrière” qui traduit qu'une condition suffisante pour que “*je ne prends pas mon parapluie*” soit vrai est que “*le temps est beau*” soit vrai.

Cette structure particulière donne aux systèmes experts des propriétés très intéressantes. Par exemple, la résolution d'un problème consiste à définir les faits initiaux de ce problème (le cahier des charges), puis à demander au moteur d'inférences d'utiliser les règles pour déduire la solution du problème.

On constate que le processus peut être facilement enrichi en ajoutant simplement de nouvelles règles dans la base de règles et ce, sans modifier le moteur d'inférences, c'est-à-dire le programme.

L'autre aspect intéressant des systèmes experts est strictement lié au concept de base de connaissances. Celles-ci constituent une sorte de réservoir où peut être stockée progressivement la connaissance relative à un domaine.

De ce point de vue, les systèmes experts, sont des outils susceptibles d'être enrichis en permanence tout en assurant la sauvegarde et la continuité ou la pérennité de la connaissance.

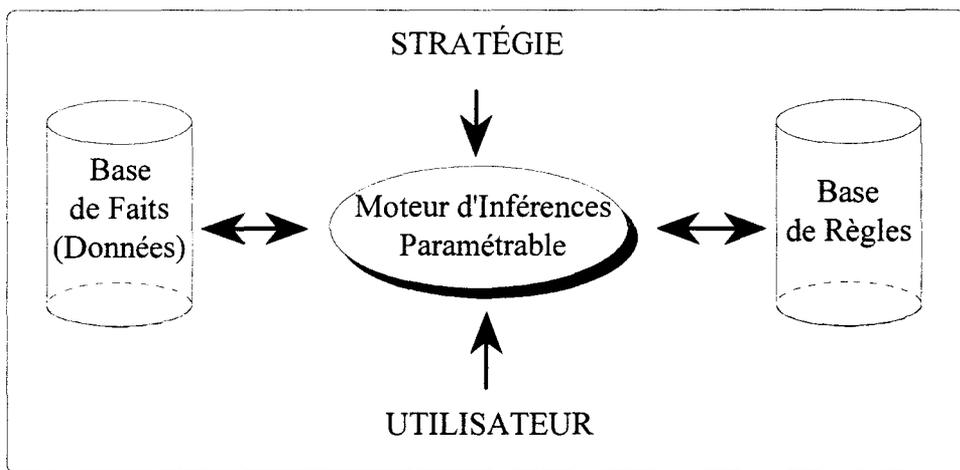


Fig. 1.1. Structure Générale des Systèmes Experts.

Pour faciliter l'utilisation de ces outils, on associe souvent à la structure de base illustrée par la Fig. 1.1 des fonctionnalités permettant de gérer les bases de connaissances, ajout et suppression des faits et des règles, et de combiner les différentes stratégies de résolution conformément à la Fig. 1.2.

En outre, les systèmes experts sont souvent dotés de mécanisme d'explication du raisonnement "trace" réalisé par le système. Ces mécanismes font le succès des systèmes experts en matière de convivialité et de pédagogie.

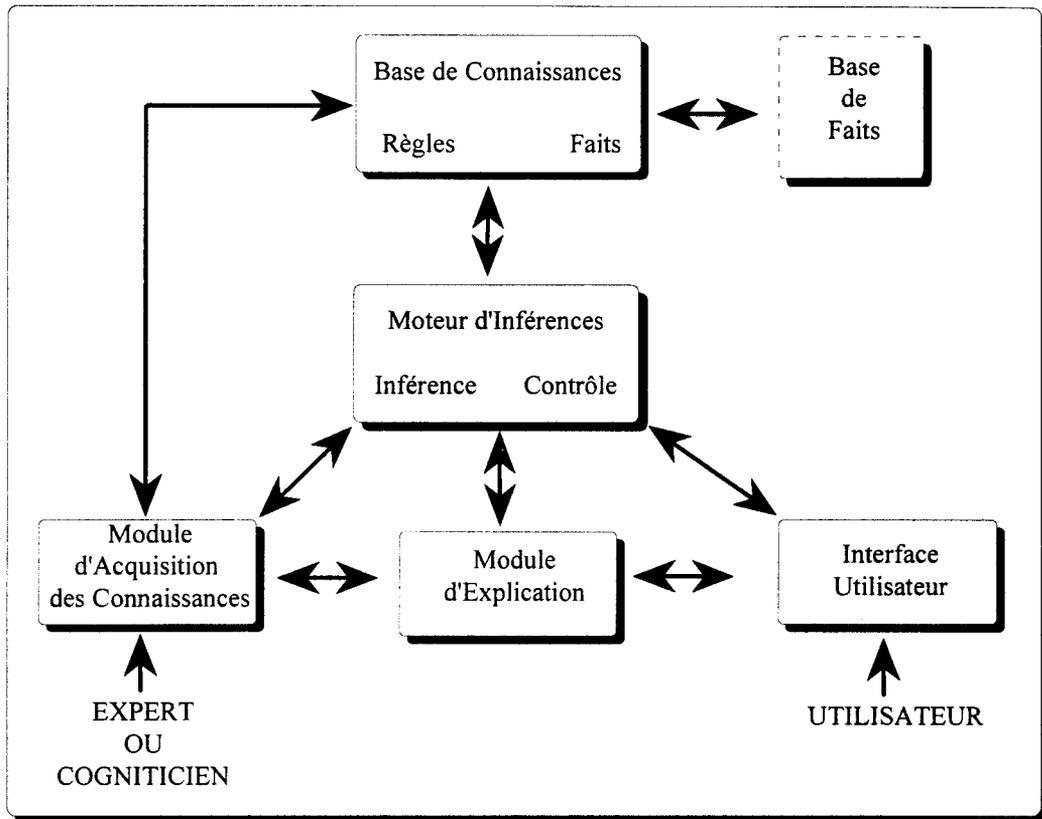


Fig. 1.2. Architecture d'un Système Expert à Base de Connaissances.

1.3 - ACQUISITION DES CONNAISSANCES

Pour utiliser un système expert il faut disposer de toutes les informations utiles à la description et à la résolution du problème à traiter. C'est la collecte préalable de ces informations qu'on appelle "acquisition de connaissances".

La phase d'acquisition de connaissances est extrêmement importante. Elle est à l'origine de l'exactitude et de la complétude des informations contenues dans le système, c'est-à-dire de son aptitude à résoudre efficacement les problèmes. C'est à l'issue de l'acquisition de connaissances que va être choisie une technique de représentation et un modèle du problème à traiter. Ce modèle sera d'autant mieux adapté que l'acquisition de connaissances sera précise, concise et fidèle [BRASSARD 89].

Depuis peu, l'acquisition des connaissances est devenue l'un des problèmes centraux lors de la mise en œuvre des systèmes experts. Cette activité est devenue une discipline théorique à part entière c'est la science cognitive.

Nous allons présenter dans ce qui suit les principaux problèmes liés à l'acquisition ou l'extraction des connaissances dans le domaine d'évaluation des performances et d'analyses de stabilité des machines à réluctance variable. Ceci nous amènera à dessiner l'esquisse d'une méthodologie permettant l'extraction des connaissances liées à l'expérience d'un expert humain en la matière.

1.3.1 - Problèmes Posés par l'Acquisition des Connaissances

Pour évaluer les performances ou analyser la stabilité d'une Machine à Réluctance Variable on doit faire face à une grande diversité de connaissances dont les sources sont très nombreuses et parfois conflictuelles.

Lors du processus d'évaluation ou d'analyse, l'expert de la MRV suppose la validité d'un certain nombre d'approximations et d'hypothèses afin de pouvoir simplifier son activité. Il manipule des connaissances scientifiques (des modèles physico-mathématiques) et même des connaissances empiriques déduites des résultats expérimentaux.

Ces heuristiques ou connaissances empiriques résultent de la complexité du problème et la variété des modèles.

1.3.2 - Méthodologie Générale d'Acquisition des Connaissances

Bien que différentes approches soient proposées pour mener à bien la tâche d'extraction de connaissances, il n'existe pas une méthodologie universelle pour l'acquisition des connaissances. Cette tâche est assurée par le cogniticien qui est la personne responsable de la saisie du savoir et de l'élaboration des systèmes de connaissances.

Les recherches dans ce domaine sont relativement récentes et débordent largement du cadre purement technique de résolution d'un problème. En effet, le domaine des sciences cognitives fait très largement appel à la psychologie, science souvent inconnue de l'ingénieur. On peut noter toutefois un certain nombre de conseils, qui découlent souvent du bon sens, et qui garantissent un minimum de succès. Ces conseils portent essentiellement sur deux aspects importants du travail : les conditions de l'extraction de la connaissance et la méthodologie générale à adopter.

Les conditions de l'extraction sont définies par les moyens à mettre en œuvre pour mener à bien cette tâche.

Le premier point porte sur la constitution de l'équipe des cognitivistes. Certains préconisent que le cognitiviste soit totalement candide ou ingénu, vis-à-vis du domaine d'expertise, pour garantir l'impartialité et l'objectivité de l'extraction. D'autres pensent, au contraire, que pour établir un lien efficace, l'expert et le cognitiviste doivent parler le même langage et donc, posséder le même type de formation.

Nous pensons qu'une équipe constituée de cognitivistes ayant des sensibilités différentes garantit le meilleur compromis comme c'est le cas par ailleurs dans le domaine de l'innovation.

Les autres points concernent les précautions d'usage à respecter pour mener à bien l'acquisition des connaissances :

- si plusieurs experts du domaine sont disponibles, il est préférable de les isoler,
- le travail se présente sous la forme d'entretiens courts et bien préparés,
- à chaque début de séance, le but de l'entretien et les objectifs à atteindre sont présentés à l'expert afin de bien situer le domaine des connaissances que l'on veut analyser (performances, stabilité, convertisseur, ...).

Quant à la méthodologie générale, elle définit un schéma directeur pour l'évolution du contenu et des objectifs des entretiens. Ce schéma ne peut être rigide car il dépend d'un nombre important de facteurs difficilement maîtrisables (facteurs humains, complexité du domaine et du problème à traiter, la nature de la connaissance à extraire, ...).

On peut toutefois en donner une description ou un modèle :

- lors des toutes premières séances, le cognitiviste doit éviter d'être directif. La meilleure approche consiste à partir d'un exemple choisi par l'expert en fonction des critères de représentativité par rapport à la classe de problèmes à traiter,
- parallèlement au travail réalisé avec l'expert, le cognitiviste doit recueillir et analyser les règles et la stratégie utilisées afin d'aboutir à une décomposition du problème en tâches indépendantes. L'analyse est d'autant plus fidèle qu'elle exploite différents exemples significatifs,
- dans les étapes ultérieures du travail, le cognitiviste demande à l'expert de revenir de proche en proche sur les sous-problèmes dégagés. Cette décomposition doit être reconduite tant que la connaissance recueillie n'a pas atteint un degré de finesse suffisant pour permettre de traiter de façon uniforme tous les exemples représentatifs proposés par l'expert.

1.3.3 - Analyse des Connaissances

L'analyse des Connaissances a pour objet de spécifier à la fois les éléments pertinents de connaissances pour la classe de problèmes à traiter, ainsi que les stratégies à mettre en œuvre pour résoudre ces problèmes. Pour cela, le cogniticien doit définir clairement les modèles et la nature des informations manipulées (analytiques, heuristiques, empiriques et formelles) ainsi que leurs portées.

La définition de ces modèles permet d'isoler les éléments de la connaissance à approfondir et, à terme, d'aboutir à une description complète et détaillée du problème. De plus, le cogniticien doit établir les liens entre les différentes stratégies utilisées par l'expert afin d'en déterminer les points de divergence. Enfin, c'est lors de l'analyse qu'on doit vérifier la complétude ou l'intégralité et la cohérence de la connaissance obtenue.

Pour être efficace, l'analyse doit être menée en parallèle avec la phase d'acquisition. Le cogniticien doit s'attacher à recenser et isoler les différents éléments autour desquels s'articule la connaissance.

Par exemple dans le cas de dépannage d'une automobile les éléments à répertorier sont les différentes sous-fonctions du moteur, les éléments de la structure ou les symptômes de panne. Puis, pour chaque élément de connaissance, il faut déterminer d'une part les moyens (les règles) dont on dispose pour l'évaluer, et d'autre part les critères d'évaluation qu'il faut utiliser.

L'analyse des critères permet alors soit de décomposer l'élément de connaissance, soit de le spécifier complètement et simplement en terme de relations de causes à effets. Enfin, il faut exprimer l'objectif global à atteindre lors de résolution du problème au moyen des critères élémentaires dégagés pour chaque élément de connaissance c'est-à-dire spécifier une stratégie générale d'utilisation des connaissances.

Au terme de l'analyse, le cogniticien dispose d'une description du domaine et des connaissances disponibles. Il peut alors formaliser les différents concepts dégagés pour les mettre en œuvre dans la base de connaissance d'un système expert.

En réalité, les cogniticiens suivent une démarche sensiblement inverse à celle présentée. Ils utilisent le formalisme disponible sur un système expert pour guider l'analyse de la connaissance. Cette technique est intéressante car elle permet de mettre en œuvre immédiatement la connaissance. Le cogniticien peut alors analyser les conséquences de chaque élément de connaissance sur la résolution du problème.

C'est pour cette raison qu'aujourd'hui les systèmes experts sont spécialisés dans des domaines très pointus (diagnostic technique, diagnostic médical, gestion financière, ...) en fonction du formalisme offert pour modéliser les connaissances. Cependant, nous pensons que ce type d'approche peut amener le cognitif à déformer la vérité pour la faire coller à un moule qui n'est pas toujours adapté.

1.4. - REPRÉSENTATION DE CONNAISSANCES DANS LES SYSTÈMES EXPERTS

La puissance d'un système expert réside dans sa faculté à stocker et à manipuler la connaissance. Le stockage de la connaissance nécessite sa modélisation et sa mise en œuvre informatique. La modélisation ou représentation des connaissances est l'un des problèmes clefs rencontrés dans les systèmes experts [ROTH 83]. En effet, les modèles de la connaissance, doivent être suffisamment riches, pour pouvoir supporter les tenants du raisonnement humain.

Représenter la connaissance du domaine signifie modéliser les concepts humains utilisés pour identifier l'objet du problème (les faits) et les moyens disponibles pour résoudre ce problème (les règles). La grande diversité des concepts que nous utilisons, même pour résoudre des problèmes simples, a amené à élaborer de nombreux modèles de la connaissance. Les modèles disponibles aujourd'hui peuvent être regroupés en deux grandes classes à savoir les modèles de représentation logique et les modèles de représentation objet.

Les représentations les plus caractéristiques de la classe des modèles logiques sont la logique de propositions et la logique des prédicats du premier ordre.

Dans la logique des propositions [PINSON 81], un fait est représenté par une assertion telle que "*Le Moteur Cliquette*". Une Règle est représentée par une implication logique qui à partir d'une conjonction de faits permet de déduire d'autres faits : "*Si le Moteur Cliquette Et Consommation Importante Alors Avance Défectueuse*".

La logique des propositions est aussi appelée logique d'ordre 0 (zéro) car le concept de variable n'existe pas.

Ce modèle de base est souvent étendu à celui de la logique d'ordre 0⁺ (zéro plus). Dans ce cas les faits peuvent être valués (spécification de valeurs particulières), mais le domaine des valeurs prises par la variable est limité et connu : "*Si Température >180° Alors Classe Isolant = C*".

Ce modèle, bien que très utilisé, possède néanmoins une sémantique beaucoup trop rudimentaire, qui dans le cas de domaines complexes amène à une base de connaissances trop volumineuse souvent redondante et lourde à manipuler.

Quant à la logique des prédicats du premier ordre, qui est un modèle logique plus puissant, elle est représentée par le langage moteur d'inférence PROLOG par utilisation des clauses de HORN. Celui-ci permet de manipuler des clauses logiques (les règles) constituées de prédicats (les faits) c'est-à-dire des relations n-aires entre des variables dont le domaine de substitution n'est pas connu a priori et peut recouvrir tous les objets manipulés par cette logique (un prédicat ou même une clause).

On associe à cette représentation un mécanisme d'inférence inductif basé sur le concept d'unification. Par exemple : "*Père Mourad Khaled*" est un prédicat qui exprime que Mourad est le père de Khaled alors que "*Grand-Père x y*" :- "*Père x z*" Et "*Père z y*" est une clause qui exprime que si x est père de z et z est père de y alors x est grand-père de y.

Ce modèle est particulièrement adapté à la démonstration automatique de théorèmes. Il amène à une déstructuration totale de la connaissance. Ceci constitue un outil certes très puissant mais très difficile à maîtriser.

Le concept fondamental des représentations orientées objet est celui de classe. Une classe (ou prototype) est la représentation générique d'un objet complexe faisant intervenir des paramètres descriptifs de cet objet à savoir les propriétés. Les classes peuvent être organisés en une hiérarchie en fonction du niveau de détail dans la description de l'objet.

Cette hiérarchie est associée à un mécanisme d'héritage permettant de transmettre les propriétés d'une classe à ses sous-classes évitant toute redondance au niveau de la description.

Une classe définit donc un "moule" représentatif de tout un ensemble d'objets similaires. Une réalisation particulière de la classe est appelée instance de la classe. Une classe peut générer autant d'instances qu'il est nécessaire. Ces instances ont même structure mais se différencient éventuellement par la valeur de leurs propriétés.

On associe à chaque classe des fonctionnalités, plus particulièrement les méthodes, qui traduisent un comportement propre à la classe vis-à-vis d'une sollicitation extérieure bien précise (un message). Les notions de message et de méthodes définissent un réseau de communication permettant aux objets (classes et instances) de communiquer non seulement entre eux, mais aussi avec l'extérieur.

L'ensemble des messages que l'on peut envoyer ou communiquer à un système de classes, ainsi que l'ensemble des méthodes disponibles pour répondre à ces messages, constituent ce que l'on appelle le protocole de communication d'un langage orienté objet.

Il existe deux principales implémentations du concept de représentation orienté objet. Elles se distinguent l'une de l'autre essentiellement par le système de communication qu'elles proposent :

- les représentations qui mettent en œuvre un système de communication à base de messages et de méthodes, c'est le cas du langage SMALLTALK,
- les implémentations qui utilisent l'idée de "Frames" et proposent un mécanisme de communication s'appuyant sur les concepts de démons et de facettes. Les facettes définissent des points de vue différents dans la description des propriétés d'un objet. Les démons sont des fonctionnalités réflexes activées automatiquement lorsqu'un message est envoyé à une facette d'un objet. Le représentant le plus connu de ces implémentations est le langage FRL.

En fait, sur le plan des possibilités de représentation, il n'existe absolument pas de différences notables ces deux implémentations. Simplement, certaines applications semblent syntaxiquement plus proche d'une implémentation que d'une autre. Quoi qu'il en soit, les techniques de représentation orientées objet apportent la concision, la précision et la modularité nécessaires pour exprimer, sans aucune redondance, des connaissances fortement structurées et interdépendantes.

Beaucoup de systèmes experts mettent à profit les avantages respectifs des représentations logiques et objet en proposant des environnements qui permettent l'utilisation conjointe de règles et de classe.

1.5 - SYSTÈMES EXPERTS EN INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

L'approche système expert a été intensivement appliquée, durant la dernière décennie, dans plusieurs domaines de l'ingénierie électrique [ZHANG 89]. Elle permet de résoudre des problèmes de type diagnostic, aide à la décision et maintenance et de problèmes temps réel.

Les systèmes experts présentent un environnement très productif et une grande flexibilité d'extension et de mise à jour des différents types de connaissance.

1.5.1 - Avantages de l'Approche Système Expert

L'utilisation, de plus en plus croissante, de l'approche système expert pour la résolution de problèmes dits déclaratifs est due aux nombreux avantages qu'offre cette technologie par rapport aux méthodes de programmation conventionnelles dites aussi numériques ou algorithmiques.

Parmi ces avantages, on peut citer essentiellement :

- ASSISTANCE AUX EXPERTS HUMAINS : Le système expert permet de réduire les tâches naturelles ennuyeuses et redondantes et ainsi, il fournit à l'expert humain un environnement qui augmente sa productivité.
- FLEXIBILITÉ : Chaque règle de production représente un fragment de connaissance pertinente pour accomplir une tâche. D'où la nécessité de pouvoir ajouter, supprimer et modifier une règle dans la base de connaissance dès que l'expérience justifie la mise à jour et d'extension du système expert.
- COMPRÉHENSION : Les règles de production sont très proches du langage naturel et ainsi facile à comprendre. Le système expert a la faculté de pouvoir justifier ses conclusions et expliquer son processus de raisonnement. L'utilisateur peut, par conséquent, confirmer ou corriger la conclusion en examinant les explications données par le moteur d'inférence.
- UNIVERSALITÉ : La base de connaissance dépend du domaine du problème à traiter alors que le moteur d'inférence est totalement indépendant de ce domaine. Par conséquent, différents systèmes experts peuvent être développés en remplaçant seulement la base de connaissance.
- RAPIDITÉ : Un système expert peut, en cas de besoin, fournir l'expertise exacte et peut réagir plus rapidement que l'opérateur humain en cas d'urgence.

1.5.2 - Exemples de Systèmes Expert en Ingénierie Électrique

Les diverses applications des systèmes experts aux domaines de l'ingénierie électrique sont très nombreuses, on peut énumérer principalement les systèmes experts les plus connus :

- ASDEP (Auxiliary System Design and Evaluation Program) : C'est un système expert conçu pour la conception de tous les réseaux électriques d'une centrale de production d'énergie électrique (à l'intérieur de la centrale et entre cette dernière et les consommateurs). Cette conception doit tenir compte, à la fois des données propres à la centrale et de celles de la charge, du matériel disponible pour réaliser le réseau en question (transformateurs, câbles et disjoncteurs) et de critères de performances, fiabilité, maintenance, flexibilité, expansion et prix du réseau élaboré afin de pouvoir évaluer la qualité de la solution finale. Ce prototype de système expert a été

écrit en LISP pour des raisons de disponibilité de ce langage et sera réimplémenté dans une nouvelle version en PROLOG [PUTTGEN 88].

- Diagnostic en ligne des pannes de machines d'induction [LEITH 88] : système expert permet la détection en ligne des défauts les plus communs d'une machine à induction par simple contrôle des courants d'alimentation. Les pannes peuvent être d'origine électrique (pertes d'une phase d'alimentation, enroulement défectueux par augmentation de température ou par une mauvaise isolation), mécanique (excentricité statique ou dynamique) ou une combinaison des deux précédents électromécanique (barres rotorique brisées). L'identification de panne est accomplie par visualisation en temps réel, via des capteurs, des spectres de courants permettant de remarquer la présence, en cas d'une machine défectueuse, des pics à des fréquences bien précises autour du fondamental du courant, à $(1 \pm 2g)f$ par exemple pour des barres rotoriques brisées, où g est le glissement. Le système expert visualise le défaut qui est le nœud terminal d'un arbre de défaillance résultant de l'ensemble de l'historique du moteur, qui à son tour est lié à un arbre d'observations fait à propos des états passés du moteur en question. Ce système expert a été entièrement développé en QUINTUS PROLOG implanté sur une station de travail SUN 3/140.
- ESIMT (Expert System for Induction Motor Testing) : C'est un système expert, développé au Département de Génie Électrique de Naples (Italie), utilisant la logique floue (traitement de l'incertain), permettant de tester en temps réel un moteur à induction en fonctionnement sur site. Les paramètres du moteur à tester sont principalement, le courant, la tension, la puissance et la fréquence qui sont comparés aux valeurs admissibles en utilisant une carte d'acquisition et en effectuant des calculs de dispersion des valeurs mesurées afin de pouvoir leur affecter des coefficients de vraisemblance [BETTA 88].
- Un système expert d'aide à la décision pour le contrôle de la puissance réactive et de la tension [LIU 86] : Ce système expert est capable de détecter les problèmes de variations anormales de la tension d'un système de puissance en proposant les actions de contrôles appropriées (branchement de shunts de capacités, ajustement des rapports de transformations des transformateurs ou utilisation de compensateurs synchrones). La connaissance dans ce système expert est traduite sous forme de règles de productions.

- Un système Expert pour l'estimation des sections défailantes [FUKUI 86] : La base de données est principalement constituée par des schémas de connections des relais et des disjoncteurs sous forme de règles de productions et par des faits concernant la configuration du système sous des nœuds (ici des sections) et des branches. Le système expert est écrit en PROLOG. En utilisant des informations sur les relais de protection et les disjoncteurs en service, il est capable de reconnaître les situations d'urgence dans une salle de contrôle. Il signale ces cas aux personnes concernées en donnant des réponses (qui, comment) mêmes dans le cas des défauts multiples, ce qui constitue la première étape de la procédure de restauration.

- Un système expert d'aide au diagnostic et à la maintenance des grandes machines électriques à vitesse variable [AHRENS 93] : Le modèle utilisé est une représentation explicite des fonctions de la machine et de ses composants tels que le refroidissement, la pressurisation, les paliers, le stator et le rotor. La méthode de représentation de connaissances employée utilise les techniques de la représentation orientée objet. La fonction principale de ce système se résume en un cycle qui se traduit par une acquisition des données via des capteurs et un affichage et stockage de ces données ainsi que de leurs interprétations et le diagnostic de la machine. La phase de validation expérimentale du système est en cours dans une application industrielle chez JEUMONT INDUSTRIES.

- Un système expert pour la conception de convertisseurs des grandes machines synchrones [AHRENS 91] : C'est pour permettre un prototypage rapide et une estimation de prix des convertisseurs conçus pour des grandes machines à vitesse variable (supérieur à 1MW) que ce système a été élaboré au Laboratoire d'Électrotechnique de GRENOBLE en collaboration avec JEUMONT SCHNEIDER INDUSTRIES. Il a été écrit en PROLOG en utilisant le formalisme de règles de production. La base de données est constituée d'informations sur les différents types de thyristors avec leurs caractéristiques et prix, les types de refroidissement de la machine (air ou eau) qui sont des contraintes techniques de conception ainsi que des formules de calcul. Le système expert donne rapidement le convertisseur optimal et même les autres solutions plus onéreuses pour montrer l'influence des spécifications et des paramètres entrés sur le type et le prix du convertisseur.

- DAMOCLES (Design of Asynchronous MOtor Controlled and Led by Expert System), un système expert de conception en électrotechnique appliqué au moteur asynchrone [TRICHON 90] : Il prend en charge tous les problèmes d'itération et de rebouclage si fréquents en conception des moteurs asynchrones. Les contraintes rencontrées sont des contraintes technologiques, normatives, économiques, scientifiques et des contraintes liées au cahier des charges. Pour la gestion des hypothèses, qui symbolisent des choix effectués par le concepteur, le mécanisme de raisonnement choisi utilise les méta-règles, qui permettent de fixer au moteur d'inférence un ordre. Les solutions données par ce système expert sont utilisées pour réaliser des prototypes de machines asynchrones.

- Un système expert d'aide à la conception d'appareillage électrique [BRASSARD 89] : le modèle élaboré a été basé sur une représentation ensembliste floue. Le système expert est utilisé pour la conception des chambres de coupures des disjoncteurs à arcs tournants.

Nous venons de passer en revue certains systèmes experts utilisés dans le domaine du génie électrique, mais il existe de nombreux autres et il serait très fastidieux de les énumérer tous.

Ainsi, l'approche système expert constitue un outil d'aide à la décision permettant de minimiser les erreurs de l'opérateur humain afin de réduire les risques d'opération instable sans pour autant prétendre à remplacer ce dernier. Le choix d'une technique appropriée d'acquisition de connaissance permet de réduire considérablement le temps de développement du système expert tout en augmentant ses performances.

1.6 - CONCLUSION

Nous venons de voir dans ce chapitre certains aspects importants des applications de l'intelligence artificielle en ingénierie électrique et nous avons eu un aperçu de l'état de l'art concernant les systèmes experts déjà en service.

Un premier constat qu'on peut faire, pour évaluer les avantages de la technologie des systèmes experts appliquée au domaine des machines électriques, est de considérer la compétence de ceux-ci en correspondance avec les spécificités du domaine d'application.

La convivialité et les facilités de communication avec l'utilisateur, au moyen d'interfaces graphiques en langage naturel, sont de plus en plus indispensables pour les systèmes experts.

Cet aspect très utile au niveau de l'acquisition des connaissances et de l'explication du processus de raisonnement a d'ailleurs été développée de façon importante dans la majorité des systèmes experts cités précédemment.

Les formalismes de représentation des connaissances permettent la modélisation des connaissances du domaine étudié, souvent au moyen de règles de production ou de représentations orientées objets. On s'intéressera tout d'abord à l'acquisition des connaissances, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2 :

LES MACHINES À RÉLUCTANCE VARIABLE

2.1 - INTRODUCTION

L'appellation de machine à réductance variable (MRV) réunit des machines de structures différentes dont la propriété commune est une variation sensible de la forme de l'entrefer durant la rotation. Mais ces machines n'ont ni les mêmes caractéristiques de fonctionnement ni les mêmes performances et sont destinées à des usages très variés.

Dans ce chapitre on rappellera, tout d'abord, le principe des machines à réductance variable puis on effectuera une étude des différentes structures à réductance variable avant de procéder à leur classement. Ensuite, on établira le modèle et les équations qui régissent leur fonctionnement et permettent l'évaluation de leurs performances en régime stationnaire. On terminera par l'étude de la stabilité des MRV, par la méthode directe de LJAPUNOV, en se basant sur l'équation de mouvement exprimée en grandeurs réduites.

2.2 - PRINCIPE DE LA MACHINE À RÉDUCTANCE VARIABLE

Le principe des machines à réductance variable (MRV) a été mis en œuvre depuis fort longtemps soit pour produire des courants de fréquence élevé (10 kHz), à l'époque des début de la radio, soit plus simplement pour réaliser des actionneurs ou relais électromécaniques. Les MRV ont trouvé un regain d'intérêt, ces dernières années, en association avec des alimentations électroniques de puissance, pour des petits appareillages (moteurs pas à pas).

L'emploi des MRV est envisagé actuellement pour des entraînements à grande vitesse de rotation (machines à rotor massif) ou, au contraire, pour des entraînements lents à couple élevé (machines vernier).

Ce principe est basé sur celui de l'électroaimant. En fait, il s'agit de la plus ancienne méthode de conversion électromécanique. Toute machine à réductance variable pure est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active et l'autre passive.

La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi, denté mais sans aucun conducteur ni aimant.

Les Fig. 2.1a et 2.1b représentent des structures élémentaires (monophasées et idéales) linéaires et tournantes de machine à réductance variable.

Du fait de la simplicité du principe, les structures de la machine à réductance variable sont très variées et l'imagination des ingénieurs et chercheurs n'a guère eu de limites. Actuellement, deux structures retiennent plus particulièrement l'attention parce qu'elles présentent une grande simplicité de construction et donc des possibilités de

réduction de coût. Ce sont les machines dites "Synchrones à Réluctance" (Synchronous Reluctance Machines) et les MRV à double saillance (Switched Reluctance Machines).

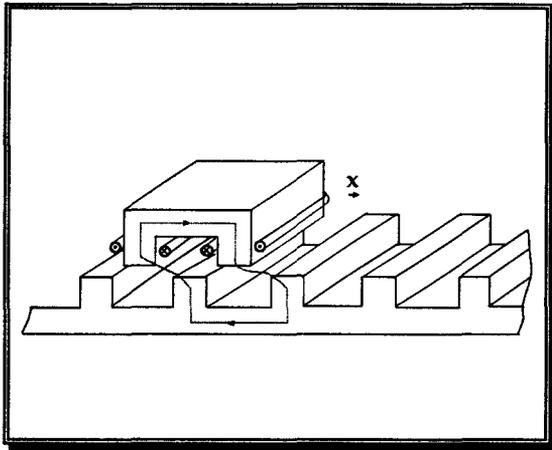


Fig. 2.1a. Structure Linéaire.

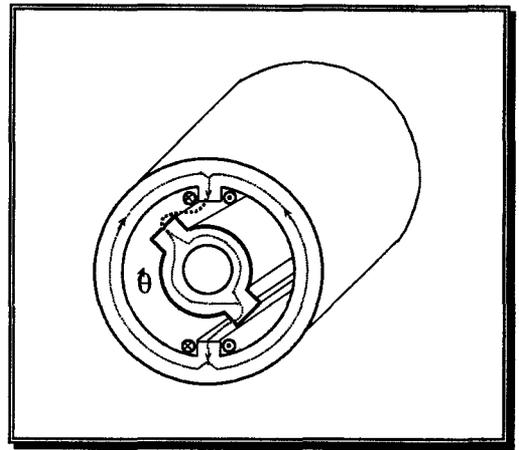


Fig. 2.1b. Structure Tournante.

Les premières sont à champ tournant, ce sont des machines synchrones à pôles saillants au rotor sans excitation. Les enroulements sont généralement triphasés et alimentés en courant alternatifs sinusoïdaux. Les cours classiques d'électrotechnique mettent en évidence, dans l'expression du couple électromagnétique d'une machines à pôles saillants, deux termes : l'un dit synchrone et qui est lié au produit vectoriel du champ inducteur avec celui de l'induit, le second dit de réluctance est proportionnel au carré du champ d'induit ou du flux dans le cas d'une alimentation à flux forcé. C'est ce dernier terme qui est exploité dans les machines synchrones à réluctance.

Les secondes sont à "champ pulsé", on peut assimiler le stator à une succession d'électroaimants qui attirent des pôles saillants rotoriques. Des moteurs pas à pas ont été réalisés sur ce principe dès les années 1920. Une particularité importante est leur alimentation en courant unidirectionnel : un électroaimant attire une pièce ferromagnétique quel que soit le signe du courant.

Les MRV à double saillance ont été remise au goût du jour à la fin des années 1970, mais c'est seulement depuis quelques années qu'elles suscitent un réel intérêt de la part des industriels. Leurs principaux atouts sont :

- l'économie (matériaux et fabrication) due à la simplicité de la structure (empilage de tôles au stator comme au rotor et bobines concentrées),
- les possibilités de travail en ambiance extrêmes (hautes et basses températures),

- la robustesse et la sûreté de fonctionnement (aussi bien de la machine que de son convertisseur statique).

Les domaines d'application potentiels ou déjà occupés par des MRV à double saillance sont l'électroménager, les accessoires automobiles (éventuellement le moteur de traction de véhicules électriques), les machines outils, l'aéronautique et le spatial.

En conclusion une machine à réductance variable comporte toujours des matériaux ferromagnétiques dont la forme géométrique modifie la configuration du champ magnétique produit par un ou plusieurs bobinages.

La conversion électromécanique est possible lorsque la disposition spatiale des matériaux ferromagnétiques et des bobinages obéit à des règles topologiques bien précises. Les structures des machines qui en découlent sont très variées, ce qui permet de proposer des solutions utilisant la réductance variable à des problèmes techniques très différents comme les machines très rapides à rotor massif, les moteurs couples très lents ou les moteurs pas-à-pas ayant un grand nombre de pas par tour.

Par ailleurs, une des contraintes les plus fortes qui limitent l'emploi des MRV est la valeur élevée de leurs inductances. En effet, en alimentation sinusoïdale, le facteur de puissance est nettement inférieur à celui des autres machines synchrones ; lorsqu'elles sont alimentées par un convertisseur électronique de puissance, celui-ci doit permettre la commutation des courants dans ces inductances. Le couple moyen et les couples pulsatoires dépendent en outre directement de la forme des courants d'alimentation.

2.3 - MACHINE POLYPHASÉE À RÉDUCTANCE PURE (NON EXCITÉE)

Les machines à réductance variable monophasées présentent quelques difficultés :

- la non constance du couple produit au cours de la rotation, le couple engendré est fluctuant [SARGOS 81],
- l'impossibilité de démarrage autonome, pour certaines position du rotor à l'arrêt ($\theta=0$).

On résout ces difficultés au moyen de machines polyphasées à réductance variable. Ces machines se divisent, par construction même, en deux grandes catégories : les machines à stator lisse et les machines à double denture.

2.3.1 - Machine à Stator Lisse

Le schéma de principe d'une telle machine bipolaire, triphasée, à enroulements diamétraux (A, B, C) est donné par la Fig. 2.2.

Si Z_R et Z_S sont respectivement le nombre de dents du rotor et du stator de la Fig. 2.2 et si p est le nombre de paire de pôles, alors on peut écrire :

$$Z_R=2, Z_S=0, \text{ et } p=1.$$

On pourrait augmenter le nombre de dents du rotor, en conservant la relation $Z_R=2p$ que l'on peut écrire aussi pour cette machine : $Z_R-Z_S=2p$.

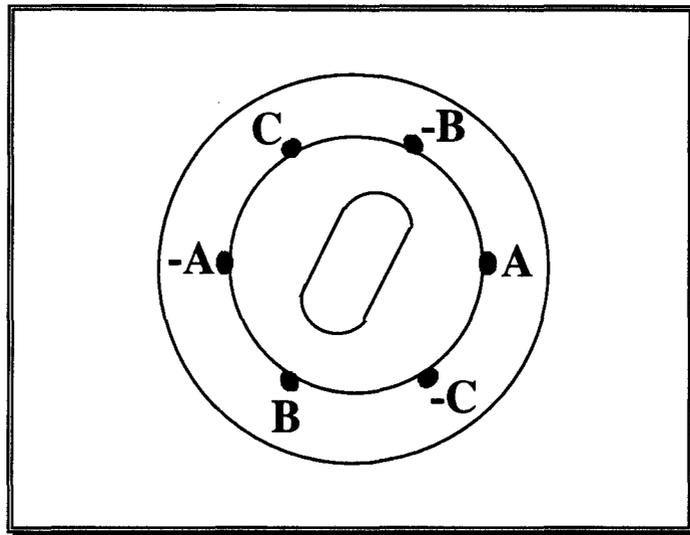


Fig. 2.2. : Schéma de Principe d'une MRV Bipolaire Triphasée.

Cette machine n'est autre qu'une machine synchrone classique à pôles saillants démunie d'enroulements d'excitation. Les enroulements (A, B, C) produisent un champ tournant auquel s'accroche le rotor.

En fonctionnement permanent, celui-ci est traversé par un flux constant au cours de la rotation ; il peut donc être réalisé en acier massif et cette particularité rend la structure intéressante pour les machines à grande vitesse de rotation.

Le stator de cette machine est un cylindre de révolution de rayon R_S dans lequel sont placées des encoches qui abritent les différents conducteurs. Cette machine est dite à stator lisse vu la faible largeur des isthmes d'encoches ϵ qui constituent une irrégularité locale négligeable dans la géométrie [SARGOS 81], [TOUNZI 93].

Au niveau de chaque encoche on peut calculer la densité de courant équivalente au courant $N.i$ passant dans le conducteur qui y est logé conformément à la Fig. 2.3.

La perméabilité du fer statorique étant supposée infinie, la densité de courant équivalente j , à la sortie de l'encoche donc par unité de hauteur de l'encoche, et qui est nulle ailleurs, est exprimée par :

$$j \approx \frac{Ni}{\epsilon} \quad (2.1)$$

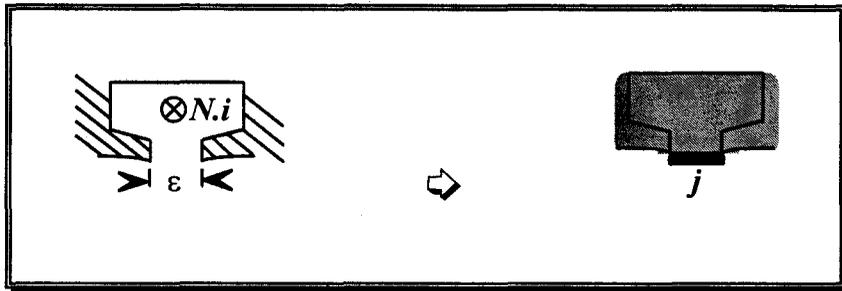


Fig. 2.3. Densité de Courant Équivalente.

2.3.2 - Machine à Double Denture

Le stator de ces machines, vu l'importance de ses encoches relativement à la denture rotorique (Fig. 2.4.), ne peut être assimilé à un stator lisse, les perturbations statoriques locales étant la cause principale de la conversion d'énergie.

Dans ce type de machines, les conducteurs n'étant pas forcément tous logés dans toutes les encoches, la définition d'une densité superficielle de courant devient très délicate surtout lorsque les irrégularités sont trop importantes et la force magnétomotrice est trop localisée. Par contre, il est possible, pour certaines MRV et sous certaines conditions, c'est le cas des MRV à stator à dents réparties ou à plots isopériodiques, de définir une densité de courant équivalente et de passer à un stator lisse équivalent [SARGOS 81].

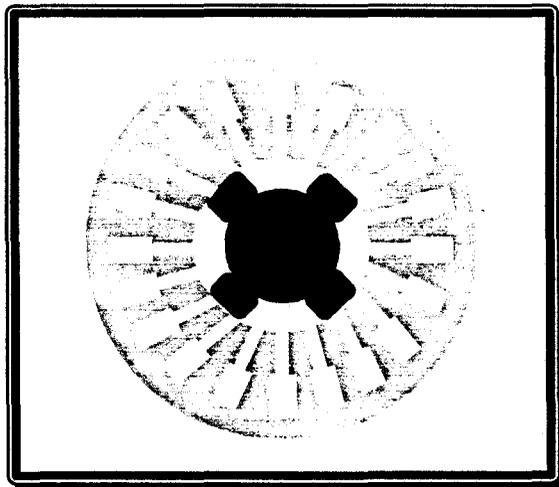


Fig. 2.4. Structure d'une Machine à Double Denture.

Les dents du rotor et du stator sont soumises à des variations d'induction cycliques, ce qui implique que le rotor soit feuilleté.

Il faut souligner qu'à l'échelle des dents, on n'a plus affaire à un entraînement par un champ tournant comme pour ceux à stator lisse. À l'échelle macroscopique, l'ordre de succession des courants dans les phases peut s'effectuer dans le même sens ou en sens contraire de la rotation du rotor, suivant le décalage spatial choisi pour les dentures du rotor et du stator sous les plots concernés [MAILFERT 90].

Les équations externes de fonctionnement de ces machines en régime sinusoïdal permanent sont identiques à celles des MRV à stator lisse.

Ces machines peuvent être considérées comme l'association d'une machine synchrone à réductance à stator lisse et d'un réducteur de vitesse électromagnétique. Les valeurs du facteur de puissance effectivement obtenues sont plus faibles (de 0,3 à 0,4) que pour les MRV à stator lisse.

Les applications de ces machines sont soit des moteurs à faible vitesse, soit des moteurs pour fonctionnement pas à pas. Elles peuvent être utilisées aussi pour effectuer des positionnements.

Les performances de ces systèmes dépendent de l'association de la machine et de son alimentation en sachant qu'il existe de nombreux types d'alimentation possibles pour une machine particulière.

2.4 - ÉNERGIE DANS L'ENTREFER

Les descriptions géométriques faites ci-dessus ne permettent pas d'évaluer les performances de ces machines. C'est pourquoi on introduira la notion d'énergie (ou la coénergie) mise en jeu dans ces machines et on établit les conditions sur les dentures qui permettent la conversion continue de cette énergie. On négligera les effets de bord (tous les phénomènes sont indépendants de la coordonnée axiale z [TOUNZI 93]).

La position instantanée du rotor par rapport au stator sera mesurée par :

$$\theta = \theta_S - \theta_R. \quad (2.2)$$

Chaque point du plan d'étude de la machine sera repérée par un angle θ_S relatif à un axe lié au stator (axe de symétrie de l'une des phases statoriques) et un angle θ_R relatif à un axe lié au rotor (axe de symétrie géométrique du rotor).

Dans l'entrefer équivalent la coénergie W est calculée à partir du potentiel vecteur A et de la densité du courant superficielle J_0 en tout point de la surface statorique :

$$W = \frac{\ell}{2} \int_{C_0} \vec{A} \cdot \vec{J}_0(S) \cdot dS. \quad (2.3)$$

C_0 étant le contour du stator dans le plan d'étude, ℓ la longueur idéale de la machine et S l'abscisse curviligne.

Si S est une fonction dérivable de θ_S alors l'équation (2.3) devient :

$$W = \frac{\ell}{2} R_s \int_{C_0} \vec{A} \cdot \vec{J}(\theta_S) \cdot d\theta_S \quad (2.4)$$

où $J(\theta_S) = \frac{1}{R_s} J_0 \cdot \frac{dS}{d\theta_S}$.

On est amené à calculer le potentiel vecteur A et à définir la densité du courant superficielle J_0 en tout point de C_0 .

2.4.1 - Densité Superficielle de Courant

Cette densité de courant provient des enroulements statoriques et sa modulation est due aux dents du stator.

Les courants d'un système q phasé à p paires de pôles, avec N_q conducteurs par pôle et par phase, en régime établi forment un système q phasé équilibré si la source est équilibrée [SARGOS 81].

Si on néglige les harmoniques, qui sont suffisamment faibles, et si on s'intéresse au fondamental alors la phase d'indice n créé, moyennant un choix adéquat de l'axe statorique δ_S , qui n'est autre que l'axe de la phase a , une densité de courant de type :

$$J_n(\theta_S, t) = p \frac{N_q}{R_s} K_b i_n(t) \sin(p\theta_S - \frac{2n\pi}{q}) \quad (2.5)$$

avec :

$$i_n(t) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi - \frac{2n\pi}{q}) \text{ et } K_b \text{ est un coefficient sans dimension relatif à la}$$

géométrie du stator.

La densité de courant résultante dans un référentiel statorique s'obtient par :

$$\begin{aligned}
 J(\theta_S, t) &= \sum_{k=1}^q J_k(\theta_S, t) = \frac{qpN_q}{2R_S} K_b I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(p\theta_S - \omega t + \varphi) \\
 &= \frac{E}{R_S} \sqrt{2} \sin(p\theta_S - \omega t + \varphi).
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

2.4.2 - Potentiel Vecteur

On considère un circuit C, en régime établi, repéré par sa position θ_1 par rapport à l'axe δ_S telle que : $\theta_1 = (\omega t - \varphi)/p$.

La composante axiale A_Z du potentiel vecteur, due à la nappe C, est une fonction périodique des trois variables θ_S , θ (ou θ_R) et θ_1 avec les pulsations respectives N_S , N_R et p .

La valeur de A_Z est inchangée lors d'une rotation des axes d'une période géométrique du stator ($2\pi/N_S$).

La densité de courant est une fonction impaire, et les géométries du stator et du rotor sont paires, par conséquent :

$$A_Z(-\theta_S, -\theta, -\theta_1) = -A_Z(\theta_S, \theta, \theta_1).$$

Par ailleurs, A_Z est une fonction sinusoïdale du temps et par suite de $p\theta_1$.

Une fonction répondant à ces diverses conditions, en l'absence de flux homopolaire, prend la forme générale suivante [SARGOS 81] :

$$\begin{aligned}
 A(\theta_S, \theta, \theta_1) &= \mu_0 E \sqrt{2} \sin p(\theta_S - \theta_1) \sum_m \sum_n a'_{m,n} \cos(mN_S \theta_S) \cos nN_R(\theta_S - \theta) \\
 &= \mu_0 E \sqrt{2} \sum_m \sum_n a_{m,n} \sin\{p\theta_1 - nN_R \theta + (nN_R - mN_S - p)\theta_S\}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

où m et n sont des entiers relatifs (m et $n \in \mathbb{Z}$), n étant le rang des harmoniques de la géométrie rotorique et m celui des harmoniques de la géométrie statorique.

$N_S=0$ si la machine est à stator lisse et, dans l'hypothèse de non saturation, les coefficients $a_{m,n} = a_{|m|,|n|}$ sont liés aux géométries statoriques et rotoriques et ne dépendent ni du temps ni des courants.

2.4.3 - Conversion Continue de l'Énergie

La coénergie calculée à partir de (2.4) peut s'exprimer aussi par [SARGOS 81] :

$$W = \sum_C \sum_{C'} W_{CC'} = \frac{\ell}{2} R_s \sum_C \sum_{C'} \int_0^{2\pi} A(C) \cdot J(C') \cdot d\theta . \quad (2.8)$$

C' étant un circuit repéré par rapport à δ_S par sa position $\theta_1' = (\omega't - \varphi')/p'$ où p' désigne le nombre de paires de pôles de la nappe C'.

Par ailleurs on a :

$$W_{CC'} = \mu_0 \ell E E' \sum_m \sum_n a_{m,n} \int_0^{2\pi} \sin \{ p\theta_1 - nN_R\theta + (nN_R - mN_S - p)\theta_S \} \cdot \sin p'(\theta_S - \theta_1') d\theta_S \quad (2.9)$$

Cette contribution énergétique est non nulle si la pulsation de l'intégrale est nulle, soit :

$$\begin{aligned} nN_R - mN_S &= p + \varepsilon p' \\ \varepsilon &= \pm 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

En remplaçant θ_1 et θ_1' par leurs valeurs dans (2.9) on obtient alors :

$$W_{CC'} = \mu_0 \pi \ell E E' \sum_{\tau} \varepsilon a_{m,n} \cos \{ \omega t - \varphi + \varepsilon(\omega't - \varphi') - nN_R\theta \} \quad (2.11)$$

où τ un triplet quelconque d'entiers relatifs (m, n, ε) vérifiant (2.10).

2.5 - CLASSEMENT DES MRV

On suppose l'existence d'un triplet $\tau_0 = (m_0, n_0, \varepsilon_0)$ privilégié des géométries statorique et rotorique et on pose :

$$\begin{aligned} Z_S &= m_0 N_S \\ \text{et} \quad Z_R &= n_0 N_R. \end{aligned}$$

En général la machine est conçue de telle manière que les fondamentaux des dentures statorique et rotorique sont prépondérants et par conséquent on choisira m_0 et n_0 égaux à 1. Seules les machines à réductance variable dites "à plots" font exception à cette généralisation vu l'importance des harmoniques de dentures générées.

Compte tenu des équations (2.9) et (2.10), le fonctionnement à énergie magnétique constante et non nulle est possible s'il existe une seule nappe de courant, c'est les cas des MRV non excitées, ou bien s'il existe deux nappes couplées au stator.

2.5.1 - Machine à Une Nappe de Courant

Pour ces machines la condition (2.10), nécessaire à la conversion continue d'énergie, se traduit par $Z_R - Z_S = 2p$. La position instantanée du rotor sera, par conséquent, $\theta = \Omega t + \theta_0 - (2\varphi/Z_R)$, où θ_0 désigne un angle constant et Ω la vitesse de rotation de la machine égale à $d\theta/dt = 2\omega/Z_R$. Cette vitesse est positive (sens de rotation direct) si Z_R est positif ($|Z_R| > |Z_S|$), négative dans le cas contraire.

Dans ces conditions, la coénergie, en régime permanent, est exprimée par :

$$W = W_{CC} = \mu_0 \pi \ell E^2 (-a_{0,0} + a_{1,1} \cos Z_R \theta_0). \quad (2.12)$$

Le couple, appelé "couple de self" et dû à la variation d'énergie d'un seul circuit C, à la vitesse de synchronisme est égal à :

$$\Gamma = \frac{\partial W_{CC}}{\partial \theta_0} = -\mu_0 \pi \ell E^2 a_{1,1} \sin Z_R \theta_0. \quad (2.13)$$

La machine la plus simple et la plus intéressante de cette catégorie est la machine "vernier" hétéropolaire polyphasée qui ne présente aucun couple pulsatoire.

2.5.2 - Machine à Deux Nappes de Courant

Pour satisfaire la condition de conversion continue d'énergie, la relation (2.10) doit s'écrire comme suit :

$$Z_R - Z_S = p + \varepsilon_0 p'. \quad (2.14)$$

En outre on a :

$$Z_R \theta = \omega t - \varphi + \varepsilon_0 + (\omega' t - \varphi') + Z_R \theta_0.$$

Dans ce cas, la vitesse de synchronisme Ω est égale à $(\omega + \varepsilon_0 \omega')/Z_R$ et la coénergie totale prend la forme suivante :

$$W = W_{CC} + W_{CC'} + W_{C'C'}.$$

Différentes machines remplissent la condition ci-dessus (2.14), elles se divisent en fait en trois catégories, selon que les deux coénergies propres dépendent ou pas de θ :

- machines à couplage simple où le couple est dû au seul couple mutuel $W_{CC'}$,
- machines "à double action" où le couple est dû à la fois un couple mutuel et un couple de self (W_{CC} ou $W_{C'C'}$ est fonction de θ),
- machines "à triple action" ici les trois composantes de la coénergie dépendent de la position et le couple se compose en un couple mutuel et en deux couples de self.

Les machines appartenant aux deux dernières catégories ont peu d'intérêt vu la fluctuation de couple de self qu'elles génèrent [SARGOS 81].

On ne s'intéressera qu'à la première catégorie, donc aux machines fonctionnant par couplage uniquement. Outre la condition (2.14), elles remplissent la condition $p \neq p'$ d'où l'on déduit :

$$Z_R - Z_S \neq 2p \neq 2p' \quad (2.15)$$

La coénergie correspondante W s'écrit alors :

$$W = \mu_0 \pi \ell (-E^2 a''_{0,0} + 2EE' a_{1,1} \cos(Z_R \theta_0) - E'^2 a'_{0,0}). \quad (2.16)$$

On en déduit le couple par :

$$\Gamma = -2\mu_0 \pi \ell EE' a_{1,1} Z_R \sin(Z_R \theta_0). \quad (2.17)$$

La formulation (2.16) de la coénergie nous amène à différencier deux types de machines à simple couplage selon la nature de leurs nappes de courants.

2.5.2.1 - Machine à Deux Nappes Indépendantes

La deuxième nappe de courant s'obtient soit par injection d'un courant continu ou alternatif triphasé de pulsation ω' dans un second bobinage statorique ayant p' paires de pôles, soit en disposant, sur la surface statorique, $2p'$ aimants qui jouent le rôle d'une nappe de courant continu.

Si on introduit le nombre de paires de pôles équivalent $p^* = |Z_R|/2$ et la fréquence interne équivalente de la machine $\omega^* = |(\omega + \varepsilon_0 \omega')/2|$ ce qui donne une vitesse $\Omega = \omega^*/p^*$, alors l'expression de la coénergie devient [SARGOS 81]:

$$\begin{aligned} W &= \mu_0 \pi \ell (-E^2 a''_{0,0} + 2EE' a_{1,1} \cos(2p^* \theta_0) - E'^2 a'_{0,0}) \\ &= LI^2 + 2M I I' + LI'^2. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Le couple généré sera alors :

$$\Gamma = -4\mu_0 \pi \ell EE' a_{1,1} p^* \sin(2p^* \theta_0). \quad (2.19)$$

La vitesse, le couple et la coénergie ainsi déterminés ont les mêmes formes que celles d'une machine synchrone à pôles lisses à p^* paires de pôles alimentée à une pulsation ω' dont les inductances propres sont constantes et seule la mutuelle dépend de θ . L'étude de ces MRV à excitation indépendante peut donc se faire dans le cadre des machines synchrones à pôles lisses.

2.5.2.2 - Machine à Deux Nappes Proportionnelles en Module

Comme les deux courants dans les deux circuits sont proportionnels en modules, on peut écrire :

$$E' = \lambda E, \text{ ou encore } K' p I' = \lambda K p I.$$

La coénergie formulée par l'équation (2.16) peut se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} W &= \mu_0 \pi \ell (KI)^2 p^2 \{-a''_{0,0} - \lambda^2 a'_{0,0} + 2\lambda a_{1,1} \cos(Z_R \theta_0)\} \\ &= \mu_0 \pi \ell E^2 p^2 \{-a''_{0,0} - \lambda^2 a'_{0,0} + 2\lambda a_{1,1} \cos(Z_R \theta_0)\} \\ &= \mu_0 \pi \ell E^2 p^2 \{-a''_{0,0} + a''_{1,1} \cos(Z_R \theta_0)\}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

La coénergie mise en jeu est similaire à celle d'une machine à un seul circuit. L'étude de ces machines peut donc être faite, à quelques modifications près, dans le cadre des machines à une seule nappe [SARGOS 81].

2.5.3 - Machine à Stator Lisse

Ces machines sont des cas particuliers des machines vernier ($N_S=0$) avec les mêmes équations.

On retiendra donc le même modèle que celui des machines à un seul circuit pour lequel on a :

$$Z_R = 2p \quad \text{et} \quad \Omega = \omega/p.$$

2.5.4 - Machine à Excitation Homopolaire

Dans les équations précédemment formulées on a supposé que la composante homopolaire des flux est nulle. Cependant, il existe des MRV excitées par cette composante homopolaire issue soit d'un déséquilibre des flux dans le plan d'étude de la machine, soit d'un enroulement statorique ou rotorique d'excitation homopolaire. Dans les deux cas, une culasse doit être prévue pour le retour du flux.

La machine étant à deux nappes couplées, la coénergie mise en jeu est due à la coénergie propre du circuit homopolaire et celle d'interaction entre celui-ci et le circuit hétéropolaire.

On introduisant le potentiel scalaire ν et la perméance du circuit \mathcal{P} , la coénergie totale dans l'entrefer s'exprime par :

$$W = \frac{1}{2} \int \nu_T^2 d\mathcal{P} \quad (2.21)$$

avec :

$$d\mathcal{P} = \frac{\mu_0 \ell R_S}{e} d\theta_S \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} g'_{m,n} \cos(mN_S \theta_S) \cos(nN_R (\theta_S - \theta))$$

et :

$$\nu_T = \nu - \nu_0 \quad (2.22)$$

où ν_T désigne le potentiel total entre le stator et le rotor au point M_S d'abscisse angulaire θ_S à un instant t , alors que ν_0 désigne le potentiel rotorique qui peut se mettre sous la forme suivante :

$$\nu_0(\theta_S, t) = \nu_0 \sqrt{2} \cos(\omega_0 t - \varphi_0).$$

Le potentiel scalaire au stator ν est obtenu par intégration de la densité de courant. En effet, la dérivée normale de A étant égale à la dérivée tangentielle de $\mu_0 \nu$, qui écrite au stator, en désignant par s l'abscisse curviligne au stator et ν_0 la composante homopolaire du potentiel scalaire, donne [SARGOS 81] :

$$\frac{\partial \nu}{\partial s} = -J_0$$

En substituant (2.22) dans (2.21) on obtient :

$$W = \frac{1}{2} \int \nu^2 d\mathcal{P} - \nu_0 \int \nu d\mathcal{P} + \frac{1}{2} \nu_0^2 \int d\mathcal{P}. \quad (2.23)$$

La coénergie totale se décompose alors en trois termes :

- une coénergie propre du circuit statorique (premier terme),
- une coénergie d'interaction entre les deux circuits (deuxième terme),
- une coénergie propre du circuit homopolaire (troisième terme).

Parmi les machines à excitation homopolaire, il existe deux machines présentant des caractéristiques intéressantes :

- * la machine à simple couplage et à excitation homopolaire :

$$Z_R - Z_S = p \quad \text{et} \quad \Omega = (\omega \pm \omega_0) / Z_R,$$

- * la machine à stator lisse et à excitation homopolaire continue :

$$p' = 0, \quad \omega' = 0, \quad Z_R = p \quad \text{et} \quad \Omega = \omega / 2p.$$

L'excitation, dans ces deux types de machines, étant indépendante du circuit principal, l'étude de ce type de machine se fera dans le cadre des machines à deux nappes indépendantes.

Dans l'étude, qui vient d'être effectuée, le fonctionnement de la machine est supposé synchrone donc la vitesse Ω est constante et est indépendante de la charge.

2.6 - MODÉLISATION DE LA MRV À STATOR LISSE

L'étude de la conversion d'énergie dans les structures à réductance variable nous a permis de spécifier les machines qui présentent des caractéristiques intéressantes (sans couple fluctuant), qui peuvent être divisées en deux groupes :

- machines à deux circuits indépendants, semblables à des machines synchrones excitées sans denture, et dont l'étude peut se faire dans le cadre des machines synchrones à pôles lisses.
- machines à un seul circuit ou à excitation série qui, moyennant la définition des grandeurs équivalentes, sont assimilables à des machines synchrones à pôles saillants.

Nous allons donc établir les équations de fonctionnement des MRV à stator lisse et les MRV à double denture. Celles à stator lisse, destinées généralement à fonctionner à des vitesses de rotation élevées, ont leurs rotors massifs munis d'amortisseurs. Les MRV à double denture, destinées plutôt à des entraînements à faible vitesse et à couple élevé, ont leurs rotors, comme leurs stators, feuilletés, sans amortisseurs.

Comme les enroulements amortisseurs n'interviennent que dans le régime transitoire et on ne s'intéresse qu'au fonctionnement en régime établi, les deux machines auront des équations de fonctionnement semblables.

On utilisera un modèle simplifié idéalisé de la MRV à stator lisse à $Z_R = 2p$.

2.6.1 - Description de la Machine

Le rotor de cette machine est massif non feuilleté à N_R dents réparties régulièrement dans lequel circulent des courants induits pendant les régimes transitoires jouant ainsi le rôle d'amortisseur. En effet, le rotor ne tournant pas ou plus au synchronisme, il est soumis au champ magnétique variable créé par le stator.

Les saillances du rotor sont à l'origine de la conversion d'énergie dans la machine et leur nombre, égal ou multiple de celui du stator, permet la continuité de la conversion.

Le stator est lisse avec un bobinage triphasé, à p paires de pôles, constitué par des conducteurs logés dans des encoches.

Dans le souci de simplifier les équations de fonctionnement, on négligera les couplages capacitifs entre les enroulements, l'effet de la température sur les valeurs des résistances et l'effet de saturation.

Par ailleurs, on admettra que les enroulements statoriques génèrent des f.m.m. à répartition sinusoïdale et que l'amplitude de leurs harmoniques est négligeable.

2.6.2 - Équations de Fonctionnement

Les performances d'une machine à réductance variable en régime établi (la vitesse de rotation est établie, donc constante) seront évaluées pour une machine non saturée et dans le cas linéaire c'est-à-dire que l'on considère une machine alimentée par un système triphasé équilibré et sinusoïdal. La machine doit vérifier les hypothèses suivantes :

- les courants statoriques produisent des flux et des forces magnétomotrices (f. m. m.) synchrones ayant une distribution sinusoïdale dans l'espace,
- les inductances ont une variation sinusoïdale avec la position instantanée du rotor,
- les courants et les tensions statoriques varient sinusoïdalement dans le temps et forment des systèmes polyphasés équilibrés.

On supposera en outre que les réactances sont constantes, c'est-à-dire que la machine n'est pas saturée.

La transformation de PARK avec des axes d et q liés au rotor, conduit à un nouveau système de variables d'état parmi lesquelles ne figure plus la position angulaire du rotor. Les enroulements statoriques sont représentés par deux bobines fictives disposées suivant l'axe longitudinal d et l'axe transversal q .

Nous allons développer, dans ce qui suit, un modèle d'évaluation des performances des machines à réductance variable en régime sinusoïdal pur dont l'avantage est de simplifier l'étape de représentation des connaissances par la suite.

Si V représente la valeur efficace des tensions simples V_A , V_B et V_C , I la valeur efficace des courants I_A , I_B et I_C de l'alimentation de la machine et φ le déphasage des courants par rapport aux tensions, les grandeurs statoriques réelles sont :

$$\begin{cases} V_A = V\sqrt{2} \sin \omega t \\ V_B = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ V_C = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} I_A = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi - \frac{2}{3}\pi) \\ I_C = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi - \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

Les équations générales des tensions de la machine à réductance variable s'obtiennent, par analogie avec la machine synchrone dépourvue d'enroulement rotorique, en écrivant que la tension appliquée à chacun des trois enroulements statoriques est la somme de la chute ohmique dans la résistance statorique R_S et de la chute inductive due au flux total qui le traverse.

$$\begin{cases} V_A = R_S I_A + \frac{d\phi_A}{dt} \\ V_B = R_S I_B + \frac{d\phi_B}{dt} \\ V_C = R_S I_C + \frac{d\phi_C}{dt} \end{cases} \quad (2.24)$$

Quant au rotor, pendant le régime transitoire, en tenant compte de son rôle amortisseur, il sera modélisé par deux enroulements en quadrature (KD suivant l'axe rotorique appelé d et KQ suivant l'axe en quadrature appelé q).

Ce modèle, couramment utilisé pour représenter les amortisseurs des machines tournantes que ceux-ci soit réels (barres amortisseurs) ou fictifs (fer rotorique), se rapproche considérablement de la réalité. Ainsi, les équations rotoriques sont :

$$\begin{cases} 0 = R_{kd} I_{kd} + \frac{d\phi_{kd}}{dt} \\ 0 = R_{kq} I_{kq} + \frac{d\phi_{kq}}{dt} \end{cases} \quad (2.25)$$

Ainsi, on aboutit au modèle schématisé par la Fig. 2.5 de la MRV à stator lisse valable en régime transitoire.

On applique la transformation de PARK, en désignant par δ l'angle que fait l'axe polaire avec l'axe de la phase A à l'instant $t=0$ où la tension V_A croissante passe par zéro, c'est l'angle de charge interne. On notera donc :

$$\delta = \omega t - p\theta \quad (2.26)$$

où θ désigne la position instantané du rotor et par ω la pulsation des courants statoriques.

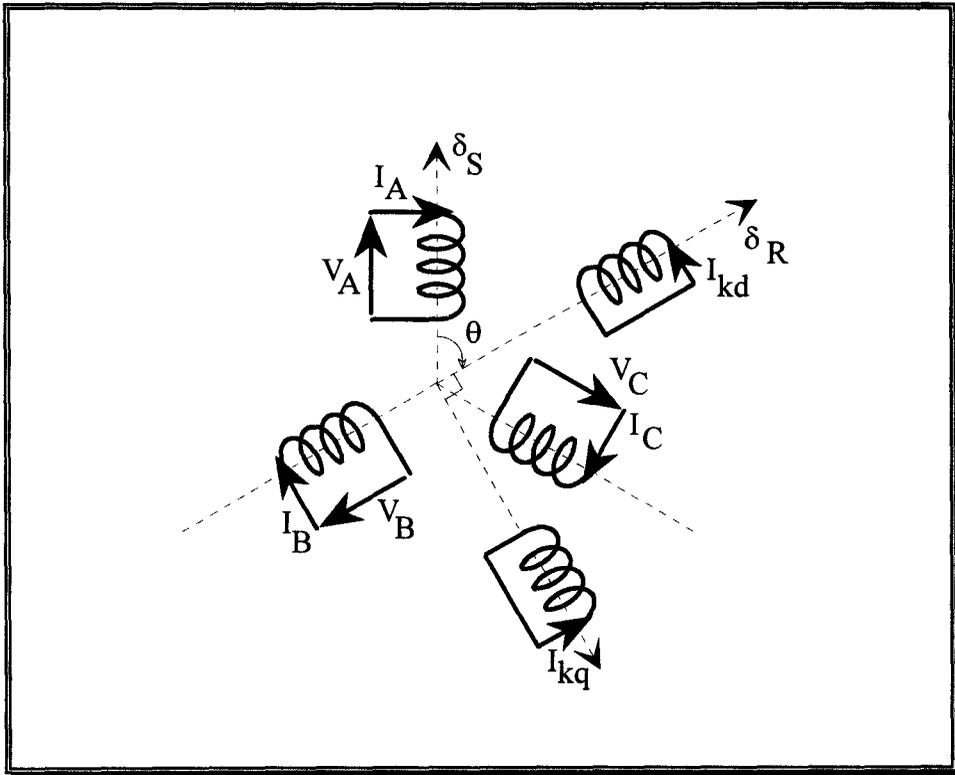


Fig. 2.5. Modèle Général de la MRV à Stator Lisse.

Les flux des différentes phases sont donnés par :

$$\begin{cases} \phi_A = L_A I_A + M_{AB} I_B + M_{AC} I_C \\ \phi_B = M_{AB} I_A + L_B I_B + M_{BC} I_C \\ \phi_C = M_{AC} I_A + M_{BC} I_B + L_C I_C \end{cases} \quad (2.27)$$

où les inductances propres sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} L_A = L_{SO} + L_{Sv} \cos 2\theta \\ L_B = L_{SO} + L_{Sv} \cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ L_C = L_{SO} + L_{Sv} \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (2.28a)$$

avec :

$$\begin{cases} L_{SO} = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \\ L_{Sv} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \end{cases} \quad (2.28b)$$

Les inductances mutuelles sont données par :

$$\begin{cases} M_{AB} = M_{SO} + M_{Sv} \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ M_{BC} = M_{SO} + M_{Sv} \cos 2\theta \\ M_{AC} = M_{SO} + M_{Sv} \cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (2.29)$$

avec :

$$\begin{cases} M_{SO} = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2} = -\frac{1}{2} L_{SO} \\ M_{Sv} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2} = L_{Sv} \end{cases} \quad (2.30)$$

Les tensions aux bornes de la machine exprimées par l'équation (2.26) peuvent se mettre alors sous forme matricielle, conformément à la Fig. 2.6, en sachant que $p \equiv \frac{d}{dt}$ représente ici l'opérateur de LAPLACE :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + pL_A & pM_{AB} & pM_{AC} \\ pM_{AB} & R_S + pL_B & pM_{BC} \\ pM_{AC} & pM_{BC} & R_S + pL_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Soit encore :

$$[V_S] = [Z_S] [I_S] \quad (2.32)$$

Dans l'équation (2.32), on effectue le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} [V_S] = [P_I(\theta)] [V_{CS}] \\ [I_S] = [P_I(\theta)] [I_{CS}] \end{cases} \quad (2.33)$$

$[P_1(\theta)]$, en abrégé $[P_1]$, est la matrice de la transformation modifiée de PARK, conservant l'invariance de la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles, qui s'écrit :

$$[P_1] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos\theta & -\sin\theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

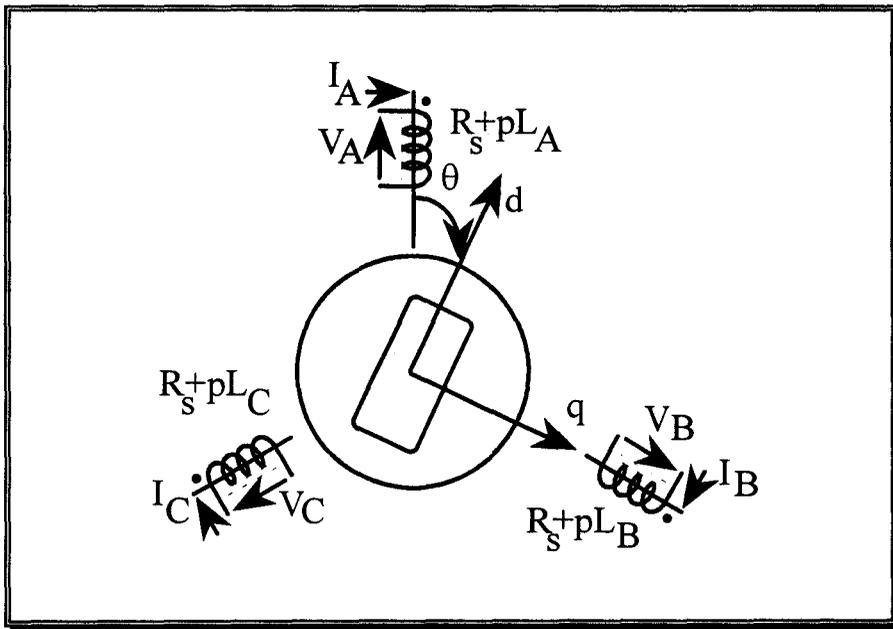


Fig. 2.6. Modèle Analytique en Régime Permanent d'une MRV à une Paire de Pôle.

Les deux axes d et q , suivant lesquels sont disposés les différents enroulements, étant en quadrature électrique, il n'existe donc aucun couplage entre deux enroulements disposés suivant chacun des deux axes.

Le changement de variable susmentionné permet le passage des grandeurs statoriques réelles V_A, V_B, V_C et I_A, I_B, I_C à leurs composantes relatives de PARK V_d, V_q et I_d, I_q .

L'écriture des équations électriques de PARK d'une machine à réductance variable à pôles lisses ayant p paires de pôles et en tenant compte de l'effet amortisseur joué par le rotor nous amène à modéliser cette machine dans le référentiel de PARK par le modèle schématisé par la Fig. 2.7.

Dès lors, les équations électriques peuvent être mises sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + pL_d & \omega L_q & pM_{kd} & \omega M_{kq} \\ \omega L_d & R_S + pL_q & \omega M_{kd} & pM_{kq} \\ pM_{kd} & 0 & R_{kd} + pL_{kd} & 0 \\ 0 & pM_{kq} & 0 & R_{kq} + pL_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

où la pulsation électrique ω est telle que $\omega = p \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$ et p étant le nombre de paires de pôles.

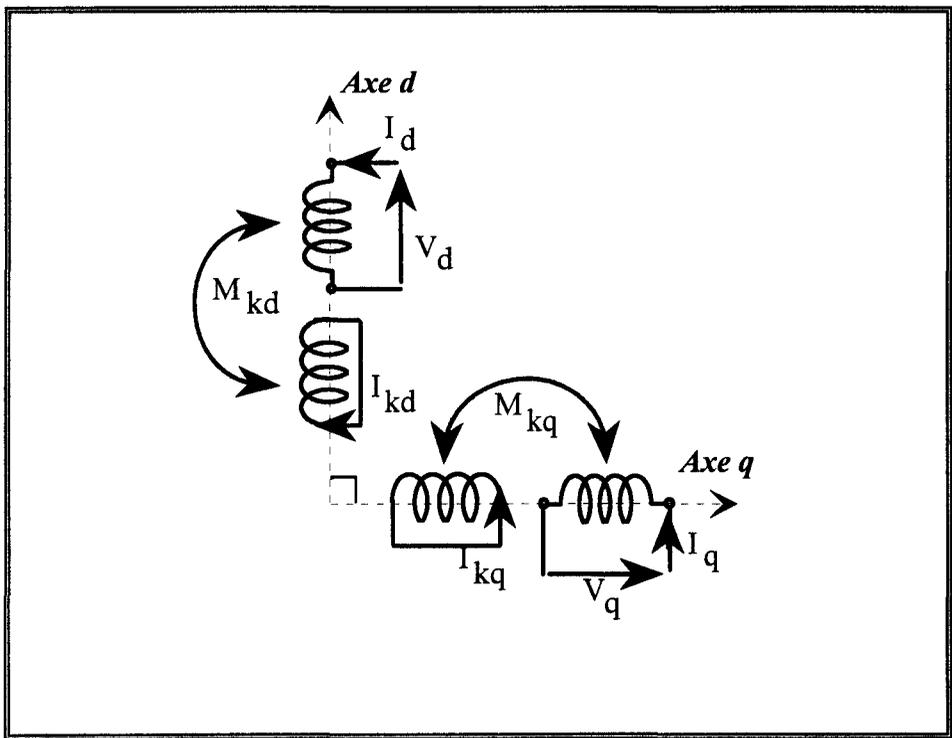


Fig. 2.7. Modèle de la MRV à Stator Lisse dans le Repère de PARK.

En sachant que i_d et i_q sont indépendants du temps et que le moteur tourne au plus au synchronisme, aucun courant n'est induit dans les enroulements amortisseurs fictifs formés par le fer rotorique ($I_{kd}=I_{kq}=0$), l'équation électrique matricielle (2.35) se réduit seulement à :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

avec :

$$\begin{cases} L_d = \frac{3}{2}(L_{SO} + L_{Sv}) \\ L_q = \frac{3}{2}(L_{SO} - L_{Sv}) \end{cases} \quad (2.37)$$

En désignant par $X_d = \omega L_d$ la réactance synchrone directe et par $X_q = \omega L_q$ la réactance synchrone en quadrature, l'équation (2.36) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & -X_q \\ X_d & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

D'où l'on obtient le schéma équivalent de la machine à réductance variable à stator lisse, en régime permanent, par phase dans un référentiel lié au rotor, comme illustré par la Fig. 2.8 ci-dessous.

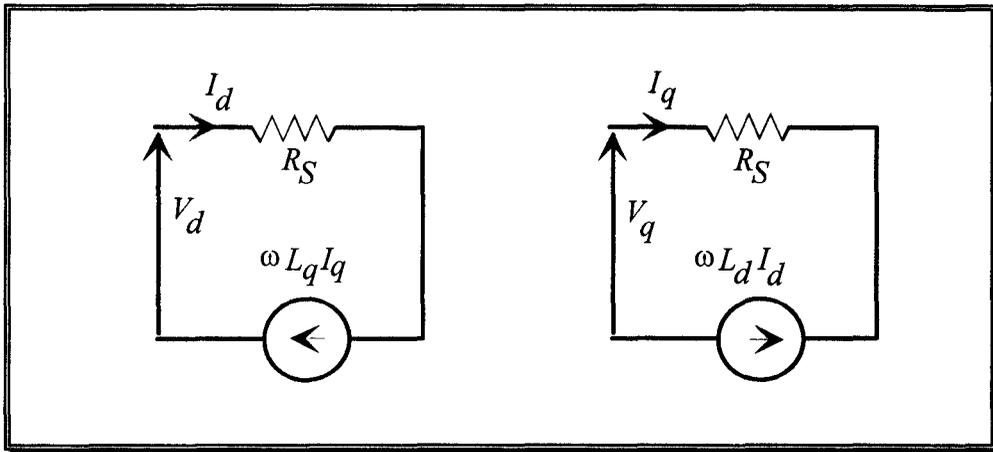


Fig. 2.8. Schéma Équivalent de la MRV dans un Repère Lié au Rotor.

Ainsi, les grandeurs permettant de caractériser un régime de fonctionnement de la machine à réductance variable n'ont pas subi de variations depuis un temps suffisamment grand, la machine est donc en régime permanent ou établi. Ce régime est régi par les équations de PARK suivantes :

$$\begin{cases} V_d = V \cdot \sin\delta = R_S I_d - X_q I_q \\ V_q = V \cdot \cos\delta = X_d I_d + R_S I_q \end{cases} \quad (2.39)$$

2.7 - MODÉLISATION DE LA MRV À DOUBLE DENTURE

Les machines à double denture étudiées dans ce paragraphe sont celles qui présentent des caractéristiques intéressantes et notamment un couple peu fluctuant, ce sont des machines vernier à un seul circuit ($Z_R - Z_S = 2p$) tournant à la vitesse $\Omega = 2\omega/Z_R$.

2.7.1 - Description de la Machine

Le rotor feuilleté de cette machine est denté à N_R dents régulièrement disposées. Le stator est constitué par une denture répartie ou des plots isopériodiques, à Z_S dents, comprenant un bobinage triphasé.

2.7.2 - Équations Générales

L'équation électrique générale appliquée aux grandeurs de phase d'une machine à réductance variable à double denture et à un seul circuit s'écrit, à partir de (2.24), sous forme matricielle :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}[\phi_S] \quad (2.40)$$

avec :

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad [I_S] = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_S] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix}.$$

Les flux des différentes phases sont donnés par :

$$[\phi_S] = [\mathcal{L}_{SS}][I_S] \quad (2.41)$$

où :

$$[\mathcal{L}_{SS}] = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix}$$

Le couple développé par cette machine se réduit à :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} [I_s]^t \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} [\mathcal{L}_{ss}] \right\} [I_s] \quad (2.42)$$

Pour cette machine et afin de se ramener à des équations similaires à celles d'une MRV à stator lisse, on introduit, comme dans §5.2.1 le nombre de paire de pôles équivalent p^* définit par :

$$p^* = \frac{|Z_R|}{2}.$$

Dès lors les équations en composantes de PARK de la machine à double denture se déduisent directement de celles trouvées pour la MRV à stator lisse en ne considérant que les équations statoriques, vu l'absence de l'effet amortisseur, et en remplaçant p par p^* , on obtient :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - p^* \frac{d\theta}{dt} \phi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + p^* \frac{d\theta}{dt} \phi_d \end{cases} \quad (2.43)$$

ou bien sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p^* L_q \frac{d\theta}{dt} \\ p^* L_d \frac{d\theta}{dt} & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

La coénergie dans l'entrefer de la machine à double denture, fonctionnant grâce à une seule nappe de courant, se limite à la seule coénergie statorique et elle est indépendante du nombre de dents au stator N_s

L'équation du couple (2.42) devient alors :

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= p^* (\phi_d I_q - \phi_q I_d) \\ &= p^* (L_d - L_q) I_d I_q. \end{aligned} \quad (2.45)$$

On remarque donc que les équations régissant le fonctionnement d'une MRV à double denture et à un seul circuit ne sont autres, à p^* près, que celles d'une machine synchrone à pôles saillants dépourvue d'enroulement d'excitation, et ne se différencient de celles d'une machine à réductance variable à stator lisse que par la prise en compte des amortisseurs fictifs du fer rotorique.

Désormais, on se limitera dans notre étude aux équations relatives aux machines à réluctance variable à stator lisse, celles des MRV à double denture s'en déduisent en annulant les deux courants amortisseurs et en changeant p en p^* .

2.8 - ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES MRV EN RÉGIME ÉTABLI

L'étude du régime permanent des MRV à stator lisse a fait l'objet de plusieurs études, soit dans le cadre des machines synchrones à pôles saillants [LESENNE 81], soit dans celui des MRV généralisés [SARGOS 81], [TOUNZI 93], [HONSINGER 71].

On est amené donc à reprendre quelques développements introduits dans l'une ou l'autre de ces études pour l'évaluation des différentes performances des machines à réluctance variable et à stator lisse.

2.8.1 - Analyse du Fonctionnement par le Diagramme Vectoriel

L'étude classique de la MRV à stator lisse, en régime permanent équilibré, en l'absence de saturation, utilise le diagramme vectoriel à deux réactances synchrones représenté par la Fig. 2.9. On va déduire, dans ce qui suit et à partir de ce diagramme, l'ensemble des caractéristiques de la machine.

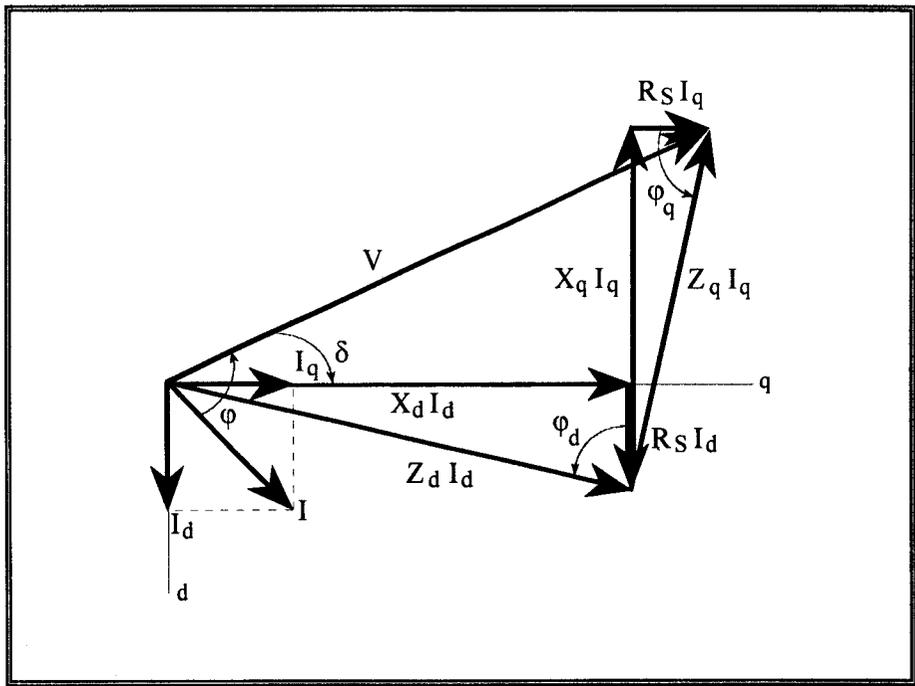


Fig. 2.9. Diagramme Vectoriel de la Machine à Réluctance Variable.

2.8.1.1 - Expressions des Courants

La résolution du système d'équations (2.39), en considérant comme inconnus les courants I_d et I_q , donne comme solutions :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V(R_s \cdot \sin\delta + X_q \cdot \cos\delta)}{X_d X_q + R_s^2} \\ I_q = \frac{V(R_s \cdot \cos\delta - X_d \cdot \sin\delta)}{X_d X_q + R_s^2} \end{cases} \quad (2.46)$$

L'équation (2.46) peut être mise sous une autre forme encore plus simple :

$$\begin{cases} I_d = \frac{VZ_q}{X_d X_q + R_s^2} \cdot \sin(\varphi_q + \delta) \\ I_q = \frac{VZ_d}{X_d X_q + R_s^2} \cdot \cos(\varphi_d + \delta) \end{cases} \quad (2.47)$$

où :

$$\begin{cases} Z_d = \sqrt{X_d^2 + R_s^2} \\ Z_q = \sqrt{X_q^2 + R_s^2} \\ \varphi_d = \tan^{-1}\left(\frac{X_d}{R_s}\right) \\ \varphi_q = \tan^{-1}\left(\frac{X_q}{R_s}\right) \end{cases}$$

La valeur efficace du courant est donnée par :

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.48)$$

2.8.1.2 - Puissances d'Entrée et de Sortie et Couple

La puissance électrique active d'entrée P_{In} pour une machine à réductance variable ayant m phases est obtenue par projection des courants I_d , I_q , exprimés en valeurs efficaces, de la Fig. 2.9 sur l'axe de tension soit [SARGOS 81] :

$$\begin{aligned} P_{In} &= 2(V_d I_d + V_q I_q) \\ &= 2V(I_q \cdot \cos\delta - I_d \cdot \sin\delta). \end{aligned} \quad (2.49)$$

Les termes en δ seront éliminés en utilisant l'équation (2.39) ce qui conduit à :

$$P_{In} = 2(X_d - X_q)I_d I_q + 2R_S I^2 \quad (2.50a)$$

La puissance réactive d'entrée Q_{In} est donnée par :

$$\begin{aligned} Q_{In} &= 2(V_q I_d - V_d I_q) \\ &= 2V(I_d \cos\delta + I_q \sin\delta) = 2(X_d I_d^2 + X_q I_q^2). \end{aligned} \quad (2.50b)$$

La puissance électrique active de sortie P_{Out} étant la puissance électrique d'entrée diminuée des pertes JOULE, à pertes fer négligeables (qui seront traitées ailleurs), on aura :

$$P_{Out} = 2(X_d - X_q)I_d I_q \quad (2.51)$$

Par ailleurs le couple de sortie est lié à la puissance électrique de sortie par la relation :

$$P_{Out} = \Gamma_{Out} \cdot \Omega \quad (2.52)$$

où $\Omega = \omega/p$ est la vitesse angulaire mécanique exprimée en rad/s.

Le couple de sortie, pour une machine à p paires de pôles devient alors :

$$\begin{aligned} \Gamma_{Out} &= 2p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \\ &= \frac{2p}{\omega} (X_d - X_q) \cdot I_d \cdot I_q \end{aligned} \quad (2.53)$$

D'après l'équation (2.47) le produit $I_d \cdot I_q$ en régime établi sera :

$$I_d \cdot I_q = \frac{V^2 f_{\omega 0}}{\omega^2 L_d L_q} \cdot \sin(\varphi_q - \delta) \cdot \cos(\varphi_d - \delta) \quad (2.54)$$

avec :

$$f_{\omega 0} = \frac{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{R_S}{X_d}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{R_S}{X_q}\right)^2\right]}}{\left[1 + \frac{R_S^2}{X_d X_q}\right]^2} \quad (2.55)$$

En substituant (2.54) dans (2.53), le couple électromagnétique développé par la machine à réductance variable à stator lisse devient :

$$\Gamma_{\text{Out}} = \frac{2pV^2 f_{\omega 0}}{\omega^2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \cdot \sin(\varphi_q - \delta) \cdot \cos(\varphi_d - \delta). \quad (2.56)$$

2.8.1.3 - Angle Interne de Charge à Vide

L'angle de charge à vide δ_{nl} s'obtient de la condition $\Gamma_{\text{Out}} = 0$, ceci implique que le produit $\sin(\varphi_q - \delta) \cdot \cos(\varphi_d - \delta)$ est égal à zéro ce qui est vraie si $(\varphi_d - \delta) = \frac{\pi}{2}$ ou si $\delta = \varphi_q$. Ce dernier est au-delà de l'angle de décrochage de la machine, ce qui conduit à :

$$\delta_{nl} = \varphi_d - \frac{\pi}{2} \quad (2.57)$$

Comme l'angle φ_d est généralement inférieur à $\pi/2$ alors δ_{nl} est négatif. L'angle δ_{nl} décroît avec la fréquence de l'alimentation tout en restant négatif.

2.8.1.4 - Angle Interne de Décrochage

L'angle de décrochage de la machine δ_{po} s'obtient si la condition $\frac{d\Gamma_{\text{Out}}}{d\delta} = 0$ est satisfaite. Ceci se traduit depuis l'équation (2.56) par :

$$\delta_{po} = \frac{\varphi_d + \varphi_q}{2} - \frac{\pi}{4} \quad (2.58a)$$

On peut exprimer (2.58a) sous une forme plus simple avec $K_x = X_d/X_q$ et $K_r = R_s/X_q$:

$$\delta_{po} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{K_x - K_r^2}{K_r(1 + K_x)} \right] \quad (2.58b)$$

L'angle de décrochage ainsi obtenu est inférieur à $\pi/4$ est il diminue quand la fréquence d'alimentation de la MRV à stator lisse décroît. En effet, quand la fréquence augmente, K_x étant constant, l'angle de décrochage est une fonction décroissante de K_r et donc croissante de ω , passant par l'origine.

2.8.1.5 - Domaine de Fonctionnement de la MRV à Stator Lisse

Un fait d'une importance considérable, pour les machines à réductance variable à stator lisse, réside dans leur fonctionnement entre un angle à vide négatif et un angle de décrochage positif ou négatif selon la fréquence d'alimentation de la machine.

Les équations (2.57) et (2.58a) révèlent que la plage de fonctionnement d'une MRV à stator lisse fonctionnant en moteur est définie par :

$$\varphi_d - \frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{\varphi_d + \varphi_q}{2} - \frac{\pi}{4} \quad (2.59)$$

Pour des fréquences d'alimentation élevée φ_d et φ_q avoisinent $\pi/2$, alors que pour fréquences très faibles ces deux angles tendent vers zéro.

Ainsi les deux cas extrêmes sont donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} 0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{4} & \quad \text{si } f \rightarrow \infty \\ -\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq -\frac{\pi}{4} & \quad \text{si } f \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2.60)$$

Le couple de sortie pour *les hautes fréquences* est obtenu à partir de l'équation (2.56) pour $\varphi_d = \varphi_q = \pi/2$, en sachant que le coefficient $f_{\omega 0}$ est égal à l'unité.

$$\Gamma_{\text{Out}} = \frac{pV^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \cdot \sin 2\delta \quad (2.61)$$

D'une manière similaire, le couple de sortie pour *les faibles fréquences* est obtenu à partir de l'équation (2.56) pour $\varphi_d = \varphi_q = 0$:

$$\Gamma_{\text{Out}} = -\frac{pV^2}{R_S^2} (L_d - L_q) \cdot \sin 2\delta \quad (2.62)$$

On peut remarquer que pour ces deux cas extrêmes le couple de décrochage Γ_{po} est obtenu respectivement pour δ_{po} égal à $\pi/4$ et à $-\pi/4$, ainsi :

$$\begin{aligned} \Gamma_{po} &= \frac{pV^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) & \text{si } f \rightarrow \infty \\ \Gamma_{po} &= -\frac{pV^2}{R_S^2} (L_d - L_q) & \text{si } f \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2.63)$$

2.8.1.6 - Couple de Décrochage

Le couple de décrochage, l'un des plus importants critères de performance, trouvé précédemment pour des fréquences trop élevées ou trop faibles doit être formulé sous une expression valable pour toutes les fréquences.

En utilisant la valeur de δ_{po} donnée par l'équation (2.58a) dans l'équation du couple de sortie (2.56) on obtient aisément :

$$\Gamma_{po} = \frac{pV^2}{L_d\omega^2} \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \cdot F_{po} \quad (2.64)$$

où le facteur adimensionnel F_{po} , qui détermine la décroissance du couple de décrochage quand la fréquence diminue, est donné par :

$$F_{po} = \frac{\sqrt{\left\{1 + \left(\frac{R_s}{X_d}\right)^2\right\} \cdot \left\{1 + \left(\frac{R_s}{X_q}\right)^2\right\} + R_s \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q}\right)}}{\left(1 + \frac{R_s^2}{X_d X_q}\right)^2} \quad (2.65)$$

Pour mieux cerner l'importance de ce facteur, on a porté sur la Fig. 2.10 ci-après la variation de F_{po} en fonction du rapport R_s/X_d pour différentes valeurs de X_d/X_q .

On déduit aisément de l'équation (2.64), que pour que la vitesse de la MRV soit variable tout en maintenant un couple constant, il faut augmenter la tension d'alimentation quand la fréquence diminue pour compenser la diminution du couple.

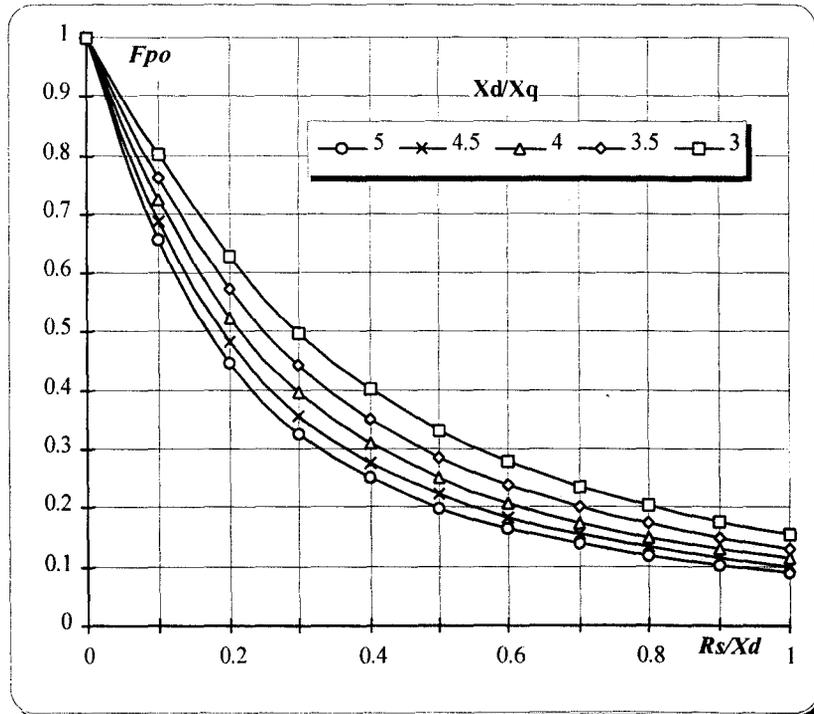


Fig. 2.10. Variation du Facteur du Couple de Décrochage en fonction de R_s/X_d

2.8.1.7 - Courant à Vide

L'angle à vide, $\delta_{nl} = \varphi_d - \frac{\pi}{2}$, substitué dans l'équation (2.47) des deux courants I_d et I_q permet de déduire l'expression du courant à vide I_{nl} :

$$\begin{cases} I_d = I_{nl} = \frac{V}{\sqrt{X_d^2 + R_s^2}} \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (2.66)$$

De cette dernière expression on peut déduire une méthode de mesure de la réactance de l'axe direct X_d :

$$X_d = \sqrt{\frac{V^2}{I_{nl}^2} - R_s^2} \cong \frac{V}{I_{nl}} \quad (2.67)$$

L'approximation de la valeur de X_d est valable pour des mesures effectuées à des fréquences d'alimentation autour de 50 Hz.

2.8.1.8 - Courant de Décrochage

De la même manière en substituant l'angle de décrochage $\delta_{po} = \frac{\varphi_d + \varphi_q}{2} - \frac{\pi}{4}$ dans l'équation (5.19) des courants I_d et I_q on obtient le courant de décrochage $I_{po} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$.

Pour simplifier l'expression de ce courant on peut utiliser l'approximation, $1 + \frac{R_s^2}{X_d X_q} \cong 1$, valable pour des fréquences d'alimentation supérieures à 30 Hz. On aura alors :

$$I_{po} \cong \frac{V}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[1 - R_s \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\right] \left[\frac{1}{X_d^2} + \frac{1}{X_q^2}\right]} \quad (2.68)$$

2.8.2 - Analyse par le Diagramme de Cercle

Certes le diagramme de cercle ne constitue pas un outil suffisamment puissant et précis pour l'évaluation des performances des MRV à stator lisse, mais il permet de mieux comprendre les phénomènes physiques tout en les visualisant sous forme de diagramme, de droites, d'arcs de cercles, etc. Par ailleurs il permet de déterminer simplement le facteur de puissance maximal de la machine.

2.8.2.1 - Écriture Complexe des Équations - Diagramme de Cercle

On utilisant les grandeurs complexes \bar{V} et \bar{I} , la puissance apparente complexe \bar{S} et les puissances active P et réactive Q fournies à la machine à réductance variable triphasée à stator lisse s'expriment comme suit [SARGOS 81] :

$$\bar{S} = 2 \bar{V} \cdot \bar{I}^* = P + jQ \quad \text{d'où :} \quad \begin{cases} P = 2 \cdot \Re(\bar{V} \cdot \bar{I}^*) \\ Q = 2 \cdot \Im(\bar{V} \cdot \bar{I}^*) \end{cases} \quad (2.69)$$

Par ailleurs, par projection sur les axes d et q de la tension et du courant du diagramme vectoriel de la Fig. 2.9 on a :

$$\begin{cases} \bar{V} = V_q - jV_d \\ \bar{I} = I_q + jI_d \end{cases} \quad (2.70)$$

D'où l'on obtient après simplifications :

$$\begin{cases} P = 2(V_d I_d + V_q I_q) \\ Q = 2(V_q I_d - V_d I_q) \end{cases} \quad (2.71)$$

En substituant à V_d , V_q les expressions de l'équation (2.39) et à I_d et I_q les expressions données par (2.46), on aura :

$$\begin{cases} P = \frac{V^2}{Z^2} [2R_s - (X_d - X_q) \cdot \sin 2\delta] \\ Q = \frac{V^2}{Z^2} [X_d + X_q - (X_d - X_q) \cdot \cos 2\delta] \end{cases} \quad (2.72)$$

avec :

$$\begin{cases} Z = \sqrt{R_s^2 + X_d X_q} \\ \delta = \omega t - \theta \end{cases} \quad (2.73)$$

V désigne la valeur efficace de la tension d'alimentation.

L'expression (2.72) des puissances active et réactive permet de définir le circuit équivalent par phase de la MRV à stator lisse conformément à la Fig 2.11. Les éléments de ce circuit équivalent, la conductance équivalente G_E et la susceptance équivalente Y_E , ont pour expressions respectivement :

$$\begin{cases} G_E = \frac{1}{X_d X_q + R_s^2} \left[R_s - \frac{X_d - X_q}{2} \cdot \sin 2\delta \right] \\ Y_E = \frac{1}{X_d X_q + R_s^2} \left[\frac{X_d + X_q}{2} - \frac{X_d - X_q}{2} \cdot \cos 2\delta \right] \end{cases} \quad (2.74)$$

L'équation électrique régissant le circuit équivalent de la Fig. 2.11 est donnée par :

$$\bar{I} = (G_E - jY_E)\bar{V}. \quad (2.75)$$

En sachant que $\bar{V} = V e^{j(\delta+\frac{\pi}{2})}$, on peut déduire $V = \bar{V} e^{-j(\delta+\frac{\pi}{2})} = -\bar{V} \sin \delta - j\bar{V} \cos \delta$.

Par substitution de cette dernière expression et celle de (2.74) dans l'équation électrique (2.75) on obtient deux expressions simplifiées de G_E et Y_E :

$$\begin{cases} G_E = \frac{1}{2Z^2} [2R_s - (X_d - X_q) \cdot \sin 2\delta] \\ Y_E = \frac{1}{2Z^2} [X_d + X_q - (X_d - X_q) \cdot \cos 2\delta] \end{cases} \quad (2.76)$$

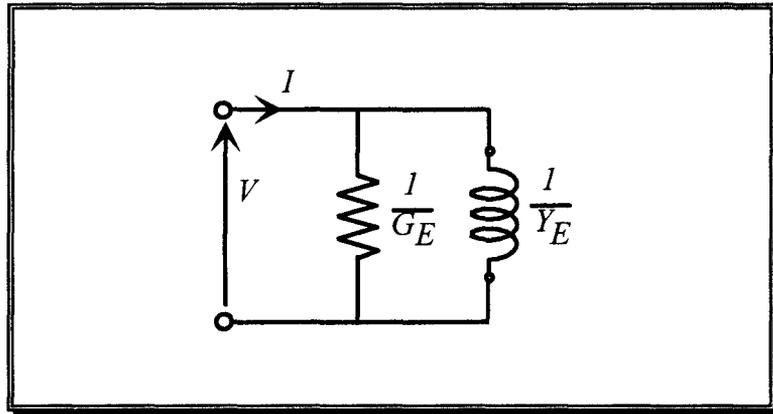


Fig. 2.11. Circuit Équivalent par Phase de la MRV.

L'affixe M de la puissance apparente complexe S ($\bar{S} = P + jQ$) décrit, lorsque δ varie, un cercle de Centre C $\left\{ \frac{2R_s V^2}{Z^2}, \frac{V^2}{Z^2} \cdot (X_d + X_q) \right\}$ et de rayon $R = \frac{V}{Z^2} \cdot (X_d - X_q)$.

Le diagramme de cercle, ainsi obtenu, est représenté sur la Fig. 2.12, tourné de $\pi/2$ suivant la pratique usuelle.

Par ailleurs, ce cercle représente aussi le lieu décrit par la puissance apparente complexe S quand δ varie. En effet, le cercle étant tracé à tension fixée, d'après l'équation (2.69), OM est proportionnel au courant I, et par suite DM et OD respectivement aux courants I_d et I_q , et l'angle $M\hat{O}P$ représente la phase φ du courant I.

La limite du fonctionnement en régime moteur est donnée par le point O', correspondant physiquement à une énergie interne nulle c'est à dire la machine fonctionne à vide, I_d a sa valeur maximale et I_q est nul.

Au point O' on a :

$$I_d = I_{nl}, \quad I_q = 0 \quad \text{et} \quad \delta = \varphi_d - \frac{\pi}{2}. \quad (2.77a)$$

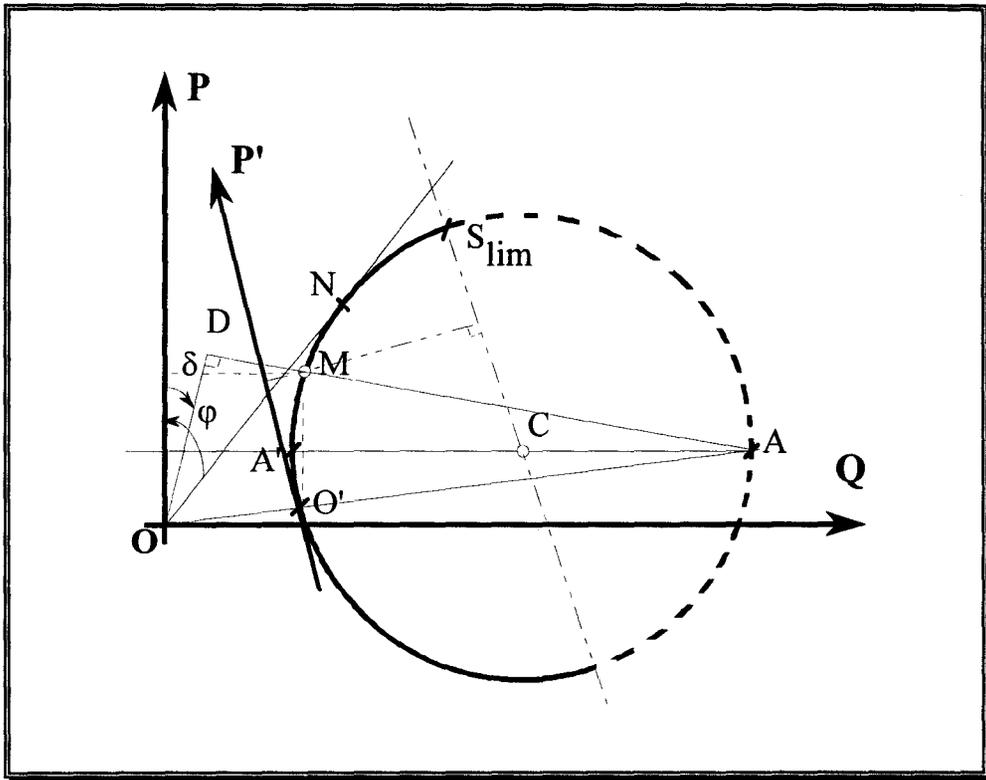


Fig. 2.12. Diagramme de Cercle d'une MRV à Tension Constante.

Le point S_{lim} correspond à limite de stabilité en régime moteur, qui sera détaillée avec une méthode plus appropriée ultérieurement, et donc physiquement au décrochage de la machine. Pour ce point, l'angle interne est alors égal à :

$$\delta = \delta_{po} = \frac{\varphi_d + \varphi_q - \frac{\pi}{2}}{2}. \quad (2.77b)$$

Le point N correspond à un fonctionnement à facteur de puissance maximal. En négligeant la résistance statorique R_S , ce facteur de puissance maximal s'écrit :

$$\cos \varphi_{max} = \frac{X_d - X_q}{X_d + X_q}. \quad (2.78a)$$

Cette expression montre clairement que le facteur de puissance maximal ne dépend que du rapport de réactances directe et en quadrature X_d/X_q . Le couple électromagnétique correspondant est égal à :

$$\Gamma_{(\cos\varphi_{\max})} = \frac{pV^2}{\omega} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cdot \sin 2\delta. \quad (2.78b)$$

2.8.2.2 - Prise en Compte des Pertes Fer et Mécaniques

Les pertes fer et mécaniques W_0 ne peuvent être ignorées puisqu'elles ont une influence sur les performances de la machine et plus particulièrement un effet sur le couple disponible sur l'arbre de la machine.

Ces pertes, suffisamment faibles, sont mesurées à vide et sont définies comme par :

$$W_0 = W_{nl} - mR_S I_{nl}^2. \quad (2.79)$$

Ces pertes se composent des pertes par Hystérésis et courants de FOUCAULT et des pertes par frottements. On peut définir un courant par phase correspondant à ces pertes tel que : $I_0 = \frac{W_0}{mV}$.

Par suite le schéma équivalent de la Fig. 2.13 sera modifié, conformément à la Fig. 2.11B, par addition d'une conductance en parallèle g_0 telle que : $g_0 = \frac{W_0}{mV^2}$.

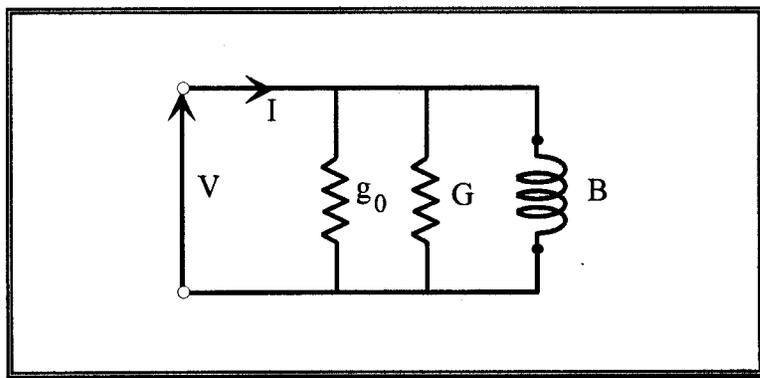


Fig. 2.13. Schéma du Modèle d'Admittance de la MRV.

En utilisant le schéma ci-dessus, les performances de la Machine peuvent être facilement évaluées à partir de la connaissance de la résistance statorique, des deux

réactances X_d et X_q , des pertes W_0 , de la tension d'alimentation et de sa fréquence et du nombre de paires de pôles. Ainsi, on aura :

$$G = \frac{1}{R_E} ; B = \frac{1}{Y_E} ; G_1 = G + g_0 \text{ et } Y_1 = \sqrt{G_1^2 + B^2}. \quad (2.80a)$$

Ce qui nous permet d'écrire le courant par phase, le facteur de puissance, la puissance d'entrée et les pertes JOULE :

$$I = VY_1 ; \cos\varphi = \frac{G_1}{Y_1} ; P_{in} = mV^2G_1 \text{ et } P_j = mR_S I^2. \quad (2.80b)$$

D'où l'on déduit la puissance de sortie, le couple de sortie et le rendement :

$$P_{out} = mV^2G_1 - W_0 - P_j ; \Gamma_{out} = \frac{P}{\omega} P_{out} \text{ et } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (2.80c)$$

2.8.2.3 - Prise en Compte de la Résistance Statorique

En tenant compte à la fois des pertes fer et mécaniques évaluées précédemment et de la résistance statorique, le facteur de puissance maximal, obtenu quand le courant est tangent au cercle, devient :

$$\cos\varphi_{max} = \frac{\frac{V}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) + \left(\frac{VR_S}{X_d X_q} + \frac{W_0}{mV} \right) \frac{1}{\sin\varphi_{max}}}{\frac{V}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) + \left(\frac{VR_S}{X_d X_q} + \frac{W_0}{mV} \right) \frac{1}{\text{tg}\varphi_{max}}}. \quad (2.81)$$

Dans le but de simplifier cette équation implicite, on va effectuer les changements de variables convenables suivants :

$$\begin{cases} x = \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \\ y = \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \\ z = \cos\varphi_{max} \end{cases} \quad (2.82)$$

Le facteur de puissance maximal, exprimé par (2.81), prend la forme suivante :

$$z = \frac{x + \frac{\alpha}{\sqrt{1-z^2}}}{y + \frac{\alpha z}{\sqrt{1-z^2}}} \quad (2.83)$$

où :

$$\alpha = 2\left(\frac{R_s}{X_d X_q} + \frac{W_0}{mV^2}\right) = \frac{2}{X_q} \beta \quad (2.84)$$

En réarrangeant l'expression (2.83) on obtient une équation de second degré en z :

$$z^2(y^2 + \alpha^2) - 2xyz + (x^2 - \alpha^2) = 0 \quad (2.85)$$

La résolution de l'équation (2.85), par rapport à z , donne :

$$z = \frac{xy \pm \alpha \sqrt{y^2 - x^2 - \alpha^2}}{y^2 + \alpha^2} \quad (2.86)$$

Finalement, en remplaçant les constantes x , y et α par leurs valeurs respectives, on obtient le facteur de puissance maximal, tenant compte de la résistance statorique et des pertes fer et mécaniques, suivant :

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{1 - \left(\frac{X_q}{X_d}\right)^2 \pm 4\beta \sqrt{\frac{X_q}{X_d} + \beta^2}}{\left(1 + \frac{X_q}{X_d}\right)^2 + 4\beta^2} \quad (2.87)$$

Dans l'expression (2.87), le signe positif correspond au fonctionnement moteur de la machine à réductance variable et le signe négatif au fonctionnement en génératrice.

La Fig. 2.14 ci-dessous montre les variations de $\cos \varphi_{\max}$ en fonction du rapport X_q/X_d pour différentes valeurs du paramètre β . La machine fonctionnant en moteur, on en déduit l'intérêt à avoir un rapport X_q/X_d aussi faible que possible pour obtenir un facteur de puissance relativement élevé.

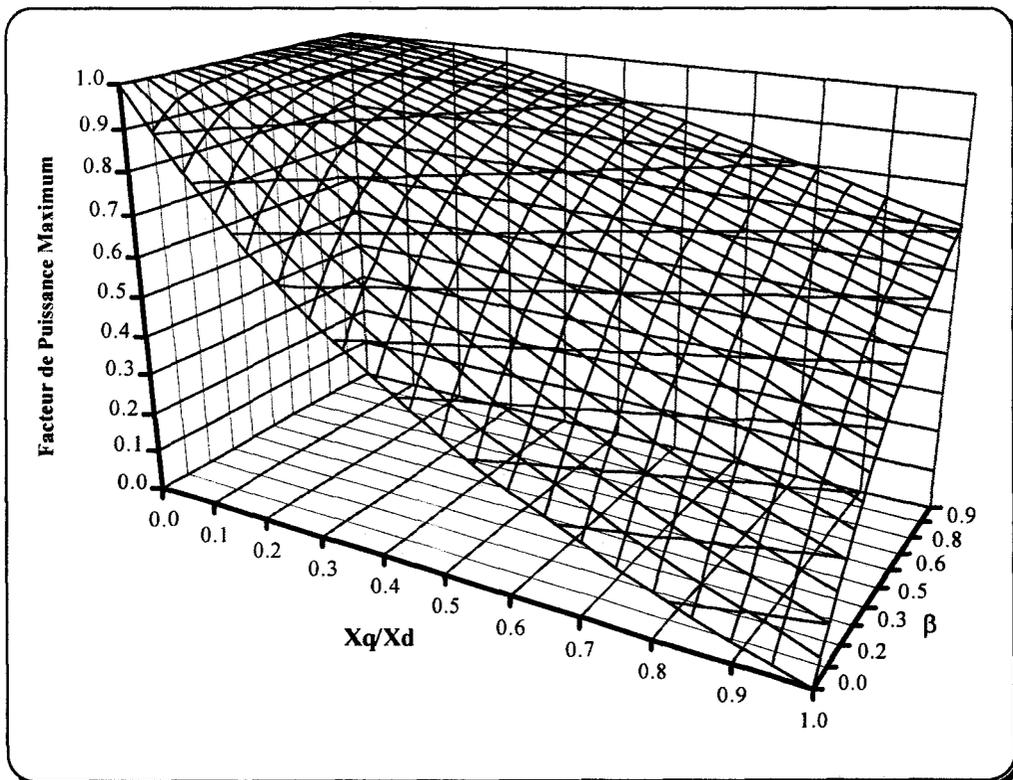
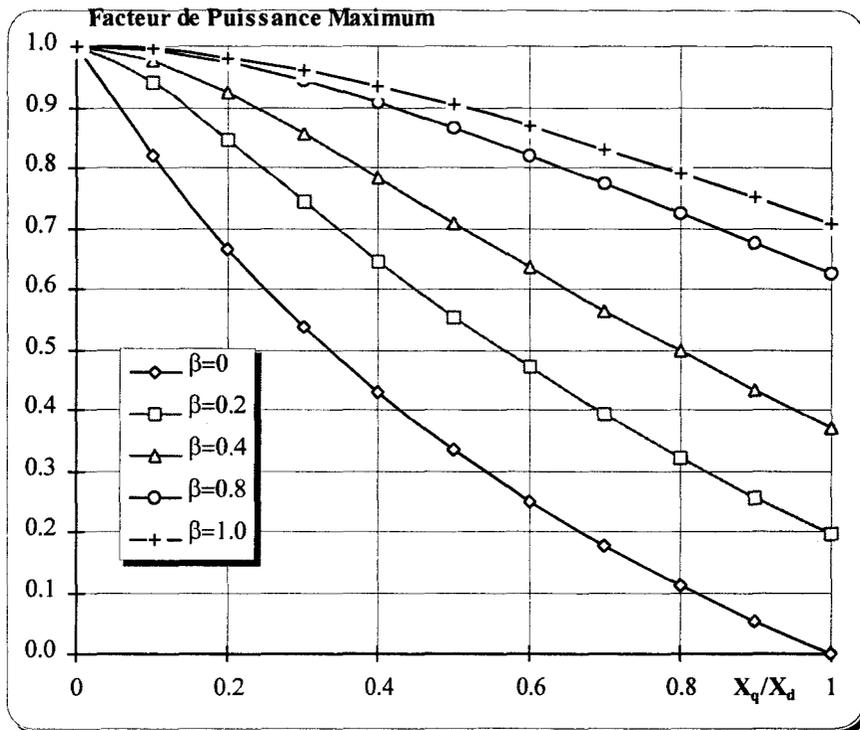


Fig. 2.14. Facteur de Puissance Maximum en Fonction de X_q/X_d

2.9 - ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES MRV PAR LA MÉTHODE DIRECTE DE LJAPUNOV

La méthode directe de LJAPUNOV présente un considérable intérêt parce qu'elle permet de juger directement la stabilité d'un système non linéaire *sans résoudre les équations différentielles non linéaires* qui le régissent.

Cette méthode a été appliquée à l'analyse des problèmes de stabilité à plusieurs systèmes d'électrotechnique et plus particulièrement aux différents types de machines électriques tournantes.

En fait, elle constitue la justification de l'approximation des petits mouvements consistant à linéariser un système non linéaire en se limitant à de petits domaines de variation de variables. Ainsi, on assimile les fonctions non linéaires des variables au premier terme de leurs développements en série.

L'originalité de notre travail, en ce qui concerne l'étude de la stabilité seule, consiste d'une part, en l'utilisation au sein d'un système expert d'une nouvelle fonction de LJAPUNOV appliquée aux MRV à stator lisse. Cette fonction, décrite dans [MIYAGI 80], permet d'obtenir des régions de stabilité plus larges que celles habituellement utilisées. D'autre part, en la résolution numérique de cette fonction par des algorithmes appropriés permettant ainsi d'obtenir des résultats précis en partant toujours des paramètres de la MRV à stator lisse et des hypothèses validées par l'utilisateur.

2.9.1 - Méthode de LJAPUNOV pour l'Étude de la Stabilité Globale

Cette méthode utilise les propriétés de fonctions $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$, dont le signe de la dérivée par rapport au temps permet la détermination de la stabilité d'une position d'équilibre $O(x_1=x_2= \dots =x_n=0)$ et la mise en évidence d'une portion du domaine d'attraction de ce point, quand il est asymptotiquement stable [MIRA 90], [GILLE 88].

Les fonctions V sont appelées *fonctions de LJAPUNOV de premières espèces* lorsqu'elles vérifient les conditions suivantes :

○ V est de signe fixe, bornée, continue, uniforme (à un point (x_1, \dots, x_n) correspond une seule valeur de V et a des dérivées partielles continues) dans un domaine borné de l'espace de phase contenant O , $V=0$ pour $x_1=x_2= \dots =x_n=0$ et seulement pour ce point, $V=c$, où c est une constante, est une surface (hypersurfaces pour $n>3$) fermée, au moins pour $|c|$ suffisamment petit, qui entoure l'origine et dépourvue de points à l'infini sauf pour c infini.

○ La surface pour $c = 0$ se réduit à l'origine des coordonnées et pour $c_1 < c_2$ la surface $V = c_1$ est entièrement située à l'intérieur de la surface $V = c_2$.

Si la première condition est vérifiée, la fonction V est dite *définie positive ou négative* selon le signe fixe. Ainsi, la fonction $V=x_1^2+x_2^2$ est définie et de signe fixe positif, on dit qu'elle est définie positive.

Considérons maintenant le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dx_i}{dt} = X_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{où } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.88)$$

Le second membre $X_i(x_1, \dots, x_n)$ est supposé continu et la solution de (2.88) est unique dans un certain domaine D de l'espace de phase (G) sauf au point $O(0, 0, \dots, 0)$. On suppose aussi que $X_i(0, \dots, 0) = 0$, c'est-à-dire l'origine est une position d'équilibre pour le système autonome (2.88). Les trois théorèmes suivants sont dus à LJAPUNOV :

○ THÉORÈME DE LJAPUNOV SUR LA STABILITÉ ASYMPTOTIQUE :

“Si pour le système (2.88) il existe une fonction définie à signe fixe $V(x_1, \dots, x_n)$, dont la dérivée totale par rapport au temps (dV/dt), écrite à partir de (2.88), est définie de signe opposé à celui de V , le point d'équilibre $O(0, \dots, 0)$ est asymptotiquement stable au sens de LJAPUNOV.”

○ THÉORÈME DE LJAPUNOV SUR LA STABILITÉ SIMPLE :

“Si pour l'expression (2.88) il existe une fonction V continue, telle que sa dérivée totale par rapport au temps (dV/dt), exprimée à partir de (2.88), est une fonction semi-définie et de signe opposé dans le même domaine, V ayant, dans un certain domaine comprenant l'origine, un signe défini, le point d'équilibre $O(0, \dots, 0)$ est stable dans ce domaine.”

○ THÉORÈME DE LJAPUNOV SUR L'INSTABILITÉ :

“Si pour (2.88) il existe une fonction V continue, $V = 0$ en O et seulement en ce point, telle que sa dérivée par rapport au temps (dV/dt), exprimée à partir de l'équation (2.88), est une fonction définie de signe fixe, V ayant, dans un certain domaine qui touche l'origine, un signe fixe identique à celui de dV/dt , le point d'équilibre $O(0, \dots, 0)$ est instable.”

Ces théorèmes permettent non seulement de conclure à la stabilité du point d'équilibre O , pour des perturbations infiniment petites (*stabilité locale*), mais encore de définir une région R , intérieure au domaine total D d'attraction de O , à l'intérieur de laquelle on est sûr que toute condition initiale donne une trajectoire qui tend vers O .

Cette région R est limitée par la plus grande hypersurface ($V = c$) contenue dans tout l'espace de phase G, et on dit que l'on a une condition de *stabilité globale*. Cette condition de stabilité par rapport aux conditions initiales est seulement suffisante, puisqu'en dehors de R il n'est pas possible de conclure.

Le domaine R déterminé dépend du choix de la fonction V, et en général il est d'autant plus grand que la fonction V est plus complexe. Par ailleurs le problème essentiel pour l'utilisation de la méthode réside dans la recherche des fonctions V. On ne connaît pas de procédé général s'appliquant à tous les cas. Dans le paragraphe suivant on exposera la procédure de construction de la fonction de LJAPUNOV utilisé depuis [MIYAGI 80] permettant d'obtenir des régions de stabilité très proches de la réalité.

2.9.2 - Méthode Générale de Construction de la Fonction de LJAPUNOV

Considérons un système autonome non linéaire représenté par l'équation suivante :

$$x' = f(x), \quad f(0) = 0 \tag{2.89}$$

Les grandeurs x , x' et $f(x)$ sont des vecteurs colonne de n lignes et $x = 0$ est un état d'équilibre asymptotiquement stable. Le problème réside dans la recherche d'une fonction de LJAPUNOV V satisfaisant l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$F(x, V, P) = P^T f(x) + \phi(x) = 0 \tag{2.90}$$

où $P = \frac{\partial V}{\partial x}$ et $\phi(x)$ est une fonction arbitraire définie positive et dont l'opposé est la dérivée par rapport au temps de la fonction de LJAPUNOV obtenue.

La méthode de LAGRANGE-CHARPIT est utilisée pour déterminer la fonction V. L'équation caractéristique de l'équation (2.90) est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{\partial F} &= \frac{dx_2}{\partial P_2} = \dots = \frac{dx_n}{\partial P_n} = \frac{dV}{P_1 \frac{\partial F}{\partial P_1} + P_2 \frac{\partial F}{\partial P_2} + \dots + P_n \frac{\partial F}{\partial P_n}} \\ &= \frac{-dP_1}{\partial_1 F + P_1 \partial_v F} = \frac{-dP_2}{\partial_2 F + P_2 \partial_v F} = \dots = \frac{-dP_n}{\partial_n F + P_n \partial_v F} \end{aligned} \tag{2.91}$$

où $\partial_n F = \partial F / \partial x_n$, $\partial_v F = \partial F / \partial V$ et $\partial_1 \phi$, $\partial_2 \phi$, ..., $\partial_n \phi$ sont inclus respectivement dans $\partial_1 F$, $\partial_2 F$, ..., $\partial_n F$.

Si on peut obtenir, depuis l'expression (2.91), les n équations suivantes contenant au moins une variable P :

$$\begin{cases} G_1(x_1, x_2, \dots, x_n, V, P_1, P_2, \dots, P_n, \partial_1 \phi, \partial_2 \phi, \dots, \partial_n \phi) = 0 \\ G_2(x_1, x_2, \dots, x_n, V, P_1, P_2, \dots, P_n, \partial_1 \phi, \partial_2 \phi, \dots, \partial_n \phi) = 0 \\ \vdots \\ G_n(x_1, x_2, \dots, x_n, V, P_1, P_2, \dots, P_n, \partial_1 \phi, \partial_2 \phi, \dots, \partial_n \phi) = 0 \end{cases} \quad (2.92)$$

alors les fonctions inconnues $\partial_1 \phi$, $\partial_2 \phi$, ..., $\partial_n \phi$ peuvent être déterminées en imposant les conditions suivantes :

$$\begin{cases} [G_i, G_j] = \sum_{k=1}^n \left(\frac{dG_i}{dx_k} \cdot \frac{\partial G_j}{\partial P_k} - \frac{dG_j}{dx_k} \cdot \frac{\partial G_i}{\partial P_k} \right) = 0 \\ [G_i, F] = \sum_{k=1}^n \left(\frac{dG_i}{dx_k} \cdot \frac{\partial F}{\partial P_k} - \frac{dF}{dx_k} \cdot \frac{\partial G_i}{\partial P_k} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.93)$$

où :

$$i, j = 1, 2, \dots, n, \text{ tel que } i \neq j \text{ et } \frac{dG_i}{dx_k} = \frac{\partial G_i}{\partial x_k} + P_k \frac{\partial G_i}{\partial V}. \quad (2.94)$$

L'équation (2.93) implique que les fonctions G_1, G_2, \dots, G_n et F ont une solution commune. À ce stade, les fonctions inconnues $\partial_1 \phi, \partial_2 \phi, \dots, \partial_n \phi$ et ϕ peuvent être exprimées en utilisant les variables d'état x_1, x_2, \dots, x_n .

Si l'équation (2.92) est résolue pour obtenir P_1, P_2, \dots, P_n en fonction de x_1, x_2, \dots, x_n et V :

$$\begin{cases} P_1 = P_1(x_1, x_2, \dots, x_n, V) \\ P_2 = P_2(x_1, x_2, \dots, x_n, V) \\ \vdots \\ P_n = P_n(x_1, x_2, \dots, x_n, V) \end{cases} \quad (2.95)$$

alors l'équation différentielle suivante est intégrable.

$$dV = P_1 dx_1 + P_2 dx_2 + \dots + P_n dx_n \quad (2.96)$$

En intégrant l'équation (2.96), une fonction *possible* de LJAPUNOV $V(x)$ peut être formulée comme suit :

$$V(x) = \int_0^x [P]^T dx \quad (2.97)$$

avec :

$$\dot{V}(x) = -\phi(x). \quad (2.98)$$

Pour que $V(x)$ soit une fonction de LJAPUNOV et par conséquent le système (2.89) soit asymptotiquement stable au voisinage de l'origine O , il faut que $V(x)$ donnée par l'équation (2.97) satisfasse, dans une région R , les critères suivants de LJAPUNOV :

- ① $V(x)$ et ses dérivées partielles d'ordre 1 par rapport à x sont continues,
- ② $V(x) = 0$ pour $x = 0$,
- ③ $V(x) > 0$ pour $x \neq 0$,
- ④ $\dot{V}(x) \leq 0$ pour $x \neq 0$,
- ⑤ $\dot{V}(x) \neq 0$ pour toute trajectoire autre que l'origine.

2.9.3 - Application aux MRV

On appliquera, dans ce qui suit, la méthode directe de LJAPUNOV pour analyser la stabilité des machines à réductance variable en partant de l'équation de mouvement qui les régissent. On utilisera une nouvelle fonction de LJAPUNOV plus générale et donnant lieu à des régions de stabilité plus larges qui se rapprochent mieux de la réalité physique. Pour se faire, il est indispensable d'exprimer, dans une première étape les différents paramètres de la machine dans un système de valeurs réduites afin de les rendre sans dimension, en l'occurrence le système "per unit". En effet, ce recours à l'adimensionnement permet non seulement la mise en évidence des paramètres régissant le problème, mais aussi de comparer les marges de stabilité de différentes machines à réductance variable.

2.9.3.1 - Systèmes de Valeurs Réduites

S'il est indispensable de mesurer les grandeurs caractérisant une machine à réductance variable, par exemple dans le système d'unités international, il est souvent utile de comparer les performances et les marges de stabilité de machines à réductance variable de même type mais de puissance différente [LESENNE 81]. On sera donc amené à prendre comme étalon de mesure, non plus une grandeur fixe, mais un étalon variable.

L'emploi d'un système de valeurs réduites est très usuel dans la littérature anglo-saxonne où il est appelé système "per unit". Il est utilisé non seulement pour les applications numériques des expressions littérales et l'interprétation physique des résultats obtenus, mais aussi lors des mises en équations et de la conduite des calculs sous forme littérale.

L'établissement d'un système de valeurs réduites repose sur le choix d'un des étalons. Certains peuvent être choisis librement, les autres en découlent par les lois régissant le système étudié. On adoptera pour les composantes relatives issues de la transformation de PARK un système de valeurs réduites.

Une grandeur réduite peut être définie comme étant un nombre sans dimension obtenu en divisant la grandeur physique par une valeur de base choisie comme référence.

Si "I" représente une grandeur physique quelconque (un courant par exemple) et I_b la grandeur choisie comme référence, on écrira :

$$\underline{I} \text{ (Valeur Réduite de I)} = \frac{I}{I_b} \quad (2.99)$$

Remarquons qu'il est aussi d'usage de noter les impédances en grandeurs réduites avec des lettres écrites en minuscule : $\underline{z} = \frac{Z}{Z_b}$.

Dans la littérature, c'est le symbole "p.u." (*per unit*) qui est employé : $I_{p.u.} = \frac{I}{I_b}$.

La notion de grandeur réduite est très souvent associée à la notion de grandeur nominale : *en choisissant comme grandeur de base la valeur nominale, la grandeur réduite est égale à "1" en fonctionnement nominal*. Mais le choix des grandeurs de base est loin d'être évident, des différences sensibles apparaissent suivant les auteurs. On peut par exemple choisir :

- de travailler avec des flux réduits sans dimension ($\underline{\psi} = \frac{\Psi}{\Psi_b}$), ou avec des flux réduits homogènes à des $(\frac{\text{rad}}{\text{s}})^{-1}$: ($\underline{\psi} = \frac{\Psi}{U_b} = \frac{\Psi}{\omega_b \Psi_b}$) ; dans ce cas c'est le produit qui devient sans dimension, l'intérêt de ce dernier choix est que les équations de l'induit s'expriment de la même manière en grandeurs réduites et en grandeurs réelles,
- d'utiliser le temps en grandeur réelle ou réduite,
- d'utiliser, pour d'autres machines, différentes valeurs de base pour les courants rotoriques.

Afin de supprimer le facteur $\sqrt{2}$ des équations, on utilisera comme référence la valeur nominale de l'amplitude maximale des grandeurs alternatives. Les grandeurs de référence relatives au stator du tableau 2.1 ci-dessous seront utilisées.

Pour la mesure de temps, on conservera la seconde [s] comme unité de temps.

GRANDEUR	GRANDEUR DE RÉFÉRENCE
COUPLE	$\Gamma_b = \frac{P_b}{\Omega_b} = \frac{3}{2} \frac{U_b I_b}{\Omega_b}$
COURANT	$I_b = \sqrt{2} I_n$
FLUX	$\psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}$
INDUCTANCE	$L_b = \frac{U_b}{I_b \omega_b}$
PUISSANCE	$P_b = 3 U_n I_n = \frac{3}{2} U_b I_b$
PULSATION	$\omega_b = \omega_n = 2\pi f_n$
RÉSISTANCE	$R_b = \frac{U_b}{I_b}$
TENSION	$U_b = \sqrt{2} U_n$
VITESSE DE ROTATION	$\Omega_b = \frac{\omega_b}{p}$

Tableau 2.1. Les Grandeurs de Référence Relatives au Stator.

On constate qu'en grandeurs réduites, les inductances et les réactances calculées à la pulsation de base ω_b sont exprimées par le même nombre :

$$L_{p.u.} = \frac{L}{L_b} = \frac{I_b \omega_b L}{U_b} = \frac{X}{X_b} = X_{p.u.}$$

De même la vitesse électrique et mécanique sont exprimées par le même nombre :

$$\Omega_{p.u.} = \frac{\Omega}{\Omega_b} = \frac{\omega}{p \Omega_b} = \frac{\omega}{\omega_b} = \omega_{p.u.}$$

L'équation de mouvement en grandeurs réelles s'écrit :

$$\sum \Gamma = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{2.100a}$$

J représente le moment d'inertie total des masses tournantes en $[\text{kg.m}^2]$, Ω la vitesse angulaire mécanique en $[\text{rad/s}]$ et $\sum \Gamma$ la somme des couples agissant sur le système.

En divisant les deux membres de (2.100a) par le couple de référence Γ_b :

$$\sum \frac{\Gamma}{\Gamma_b} = \frac{J}{\Gamma_b} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{J\Omega_b}{P_b} \Omega_b \frac{d}{dt} \left(\frac{\Omega}{\Omega_b} \right). \quad (2.100b)$$

En posant comme constante de temps mécanique, appelée aussi constante d'inertie H , exprimée en seconde $[\text{s}]$:

$$H = \frac{1}{2} J \frac{\Omega_b^2}{P_b}$$

On obtient l'équation de mouvement en grandeurs relatives :

$$\sum \Gamma_{p.u.} = 2H \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.101)$$

2.9.3.2 - Équation de Mouvement de la MRV en Grandeurs Réduites

Puisque le couple d'une machine à réductance variable, fonctionnant avec une tension fixe à ses bornes, augmente avec l'angle de charge δ , la machine est équivalente à un ressort fictif de torsion reliant l'arbre de sortie et l'axe de référence tournant, lequel dépend de la tension d'alimentation.

Si le rotor retarde par rapport à l'axe de référence, δ est positif et la machine fonctionne en moteur développant un couple moteur qui tend à accélérer le rotor. Pour des angles faibles, le couple est approximativement proportionnel au déplacement, mais lorsque l'angle augmente, le couple augmente moins rapidement, et éventuellement atteint un maximum.

Il doit être noté que le ressort équivalent constant, déduit de la caractéristique en régime permanent, est seulement correct pour des faibles variations. Pour des variations rapides, le fonctionnement peut être énormément modifié surtout par l'action des enroulements amortisseurs.

Dans la suite, et en utilisant l'analogie avec un système mécanique simple ayant amortissement et inertie mais sans raideur (les pertes fer et mécanique et l'effet de saturation sont négligés), les équations peuvent être écrites soit pour un mouvement général soit pour une petite oscillation.

En effet, dans un repère lié à la machine, en utilisant les grandeurs de référence précédemment mentionnées, la fréquence de base étant choisie égale à 50 Hz, l'équation de

mouvement, dans le système de valeurs réduites, s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{2H}{\omega} \frac{d^2\theta}{dt^2} + K_d \frac{d\theta}{dt} = \Gamma_{em} - \Gamma_\ell \quad (\text{p.u.}) \quad (2.102)$$

où on désigne par :

- H : la constante d'inertie exprimée en seconde ($H=J\omega/2$ où J est le moment d'inertie de toutes les parties tournantes),
- θ : la position instantanée du rotor par rapport à l'axe de la phase a ,
- K_d : la constante d'amortissement exprimée par un couple par radian par seconde,
- Γ_{em} : le couple électromagnétique de la machine,
- Γ_ℓ : le couple de charge.

On désigne par ω_m la vitesse angulaire électrique du système $d-q$ lié au rotor et par ω celle d'un axe lié au champ tournant statorique. Les angles θ et θ_s désignent respectivement les décalages angulaires respectifs des axes d et x par rapport à l'axe fixe de la phase a pris comme référence, conformément à la Fig. 2.15.

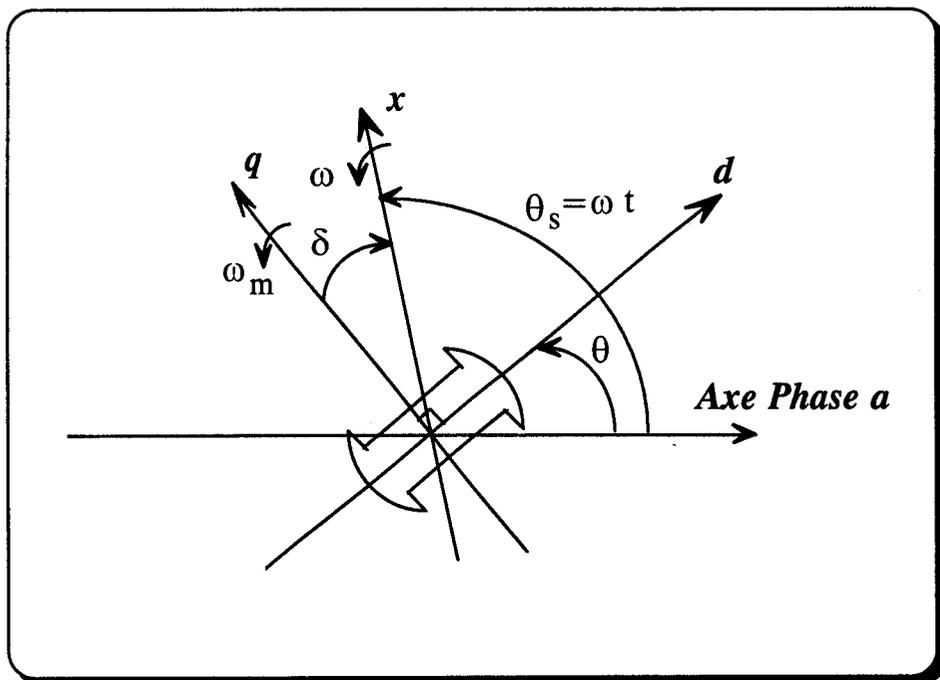


Fig. 2.15. Repérage des Divers Axes et Angles.

Par rapport aux conditions initiales, à chaque instant on a :

$$\begin{cases} \theta_s = \theta_{s0} + \omega t \\ \theta = \theta_0 + \int \omega_m dt \end{cases} \quad (2.103)$$

La position relative entre les axes q et x étant définie par :

$$\delta = \theta_s - \theta - \frac{\pi}{2} = \omega t - \theta - \frac{\pi}{2}. \quad (2.104)$$

D'où, la vitesse de rotation du rotor :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m = \omega - \frac{d\delta}{dt} \quad (2.105)$$

Par suite, l'accélération du rotor sera exprimée par :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = - \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.106)$$

Ainsi, l'équation de mouvement en fonction de l'angle de charge peut s'écrire :

$$\frac{2H}{\omega} p^2 \delta + K_d (p\delta - \omega) + \Gamma_{em} - \Gamma_\ell = 0. \quad (2.107)$$

Par ailleurs, on a :

$$\Gamma_{p.u.} = \frac{\Gamma}{\Gamma_b} = \frac{\Omega_b}{\frac{3}{2} I_b U_b} \Gamma = \frac{\Omega_b \Gamma}{P_b} = \frac{P}{P_b} = P_{p.u.}$$

Par conséquent, le couple et la puissance sont égaux dans le système de valeurs réduites.

Ainsi le ressort, auquel la machine est équivalente, a une caractéristique non linéaire. Le coefficient constant du ressort fictif, pour des petites variations autour d'un point de fonctionnement en régime stable, est donné par la pente de la courbe de la puissance en fonction de l'angle de charge. Il est appelé le coefficient du couple synchronisant et est noté P_0 .

À la suite d'une perturbation quelconque l'angle de charge interne δ de la MRV varie de $\Delta\delta$ et l'équation de mouvement (2.107) s'exprime par :

$$\frac{2H}{\omega} p^2 \Delta\delta + P_d p \Delta\delta + P_0 - P_\ell = 0. \quad (2.107)$$

où P_d désigne la constante d'amortissement exprimée par une puissance par radian par seconde.

Il apparaît, à la suite de la perturbation, un glissement de la roue polaire par rapport au champ tournant tel que :

$$s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} = \frac{d\delta}{dt}.$$

Du fait du glissement, le rotor est le siège de courants induits, à la fréquence de glissement. Il en est de même dans les enroulements statoriques où, en plus du courant de pulsation ω , il apparaît un courant de pulsation ω_m .

L'interaction des différents courants statoriques et rotoriques est à l'origine de composantes supplémentaires de couple et, de ce fait, le couple résultant en régime transitoire diffère sensiblement du couple permanent [CHATELAIN 89].

Le couple transitoire est fonction non seulement du glissement mais aussi de l'angle de charge de sorte que l'on obtient pour des faibles glissements le développement en série de TAYLOR suivant :

$$\Gamma_{\text{trans}}(s, \delta) = \bar{\Gamma}_{\text{em}} + \frac{\partial \Gamma_{\text{trans}}}{\partial s} s + \frac{\partial \Gamma_{\text{trans}}}{\partial \delta} (\delta - \delta_0).$$

$\bar{\Gamma}_{\text{em}}$ désigne la valeur moyenne du couple électromagnétique qui équilibre le couple extérieur appliqué à l'arbre de la machine.

Enfin, on retiendra l'équation de mouvement de la MRV suivante :

$$P_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} + P_0 - P_\ell = 0. \quad (2.108)$$

où P_j désigne la constante d'inertie exprimée par une puissance par radian par seconde au carré appelé souvent la puissance d'inertie.

Finalement, en réarrangeant l'expression (2.108), on obtient :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} + \frac{1}{P_j} (P_0 - P_\ell) = 0 \quad (2.109)$$

où en désigne par K_d le rapport P_d/P_j .

Par ailleurs, la puissance synchrone P_0 est donnée par :

$$P_0 = \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_S^2)^2} \left\{ (X_d X_q - R_S^2) \cdot \sin(2\delta) + R_S(X_d + X_q) \cdot \cos(2\delta) - R_S(X_d - X_q) \right\} \quad (2.110)$$

Supposons que, dans l'équation de mouvement (2.109) ci-dessus, l'angle de charge $\delta = \delta_0$ correspond à un point de fonctionnement stable en régime établi et introduisant deux variables d'état x_1 et x_2 définies par :

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \frac{d\delta}{dt} \end{cases} \quad (2.111)$$

l'expression (2.109) peut alors se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} + K_d x_2 + g(x_1) = 0 \end{cases} \quad (2.112)$$

Soit encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -K_d x_2 - g(x_1) \end{bmatrix} \quad (2.113)$$

où :

$$g(x_1) = \left[\frac{1}{P_j} \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_S^2)^2} \left\{ (X_d X_q - R_S^2) \cdot \sin 2(x_1 + \delta_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + R_S(X_d + X_q) \cdot \cos 2(x_1 + \delta_0) - R_S(X_d - X_q) \right\} - P_\ell \right] \quad (2.114)$$

On peut trouver une fonction V satisfaisant l'équation différentielle linéaire aux dérivées partielles (2.90), dès lors l'équation caractéristique devient :

$$\frac{dx_1}{f_1(x)} = \frac{dx_2}{f_2(x)} = \frac{dV}{P_1 f_1(x) + P_2 f_2(x)} = \frac{dP_1}{P_2 \cdot g'(x_1) - \frac{\partial \phi}{\partial x_1}} = \frac{dP_2}{K_d P_2 - P_1 - \frac{\partial \phi}{\partial x_2}} \quad (2.115)$$

où $g'(x_1) = \frac{dg(x_1)}{dx_1}$.

En sachant que la différentielle totale de P_2 s'écrit : $dP_2 = \frac{\partial P_2}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial P_2}{\partial x_2} dx_2$ et en supposant que $\frac{\partial P_2}{\partial x_1} = \alpha$ et $\frac{\partial P_2}{\partial x_2} = \beta$, où α et β désignent deux constantes arbitraires, on obtient, après intégration, l'expression de P_2 :

$$P_2 = \alpha x_1 + \beta x_2.$$

En outre, de l'équation (2.115) on déduit :

$$\frac{dP_2}{dx_2} = \frac{K_d P_2 - P_1 - \frac{\partial \phi}{\partial x_2}}{f_2(x)} = \alpha \frac{dx_1}{dx_2} + \beta = \alpha \frac{f_1(x)}{f_2(x)} + \beta.$$

Soit encore : $K_d P_2 - P_1 - \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = \alpha f_1(x) + \beta f_2(x).$

D'où l'on obtient les deux équations suivantes fonction de $P_1, P_2,$ et $\frac{\partial \phi}{\partial x_2}$:

$$\begin{cases} G_1 = \alpha x_1 + \beta x_2 - P_2 = 0 \\ G_2 = \alpha x_2 - \beta [K_d x_2 + g(x_1)] - K_d P_2 + P_1 + \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = 0 \end{cases} \quad (2.116)$$

On réécrivant les conditions de l'équation (2.93) imposées à G_1, G_2 et F on obtient :

$$\begin{cases} [G_1, G_2] = 2(\beta K_d - \alpha) - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} = 0 \\ [G_2, F] = x_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_2} + \alpha [x_1 g'(x_1) + g(x_1)] - \frac{\partial \phi}{\partial x_1} = 0 \end{cases} \quad (2.117)$$

La condition $[G_1, F]=0$ a été omise puisqu'elle est identique à la deuxième équation du système d'équation (2.116).

Les fonctions inconnues $\frac{\partial \phi}{\partial x_2}$ et ϕ , satisfaisant les conditions de l'équation (2.117), sont données par :

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = 2(\beta K_d - \alpha) + \Phi(x_1) \\ \phi = (\beta K_d - \alpha)x_2^2 + x_2 \Phi(x_1) + \alpha x_1 g(x_1) \end{cases} \quad (2.118)$$

où Φ désigne une fonction arbitraire de x_1 et $\beta K_d - \alpha > 0, \alpha > 0.$

On choisissant Φ telle que :

$$\Phi(x_1) = -2\sqrt{\alpha(\beta K_d - \alpha)}x_1 g(x_1) \quad (2.119)$$

afin de pouvoir écrire ϕ sous une forme carrée parfaite :

$$\phi = \left[x_2 \sqrt{(\beta K_d - \alpha)} - \sqrt{\alpha x_1 g(x_1)} \right]^2 \quad (2.120)$$

La résolution du système d'équations (2.116) relativement à P_1 et P_2 donne :

$$\begin{cases} P_1 = \alpha K_d x_1 + \alpha x_2 + \beta g(x_1) + 2\sqrt{\alpha(\beta K_d - \alpha)x_1 g(x_1)} \\ P_2 = \alpha x_1 + \beta x_2 \end{cases} \quad (2.121)$$

Afin de pouvoir vérifier l'exactitude de la définition de la fonction de LJAPUNOV résultant des calculs précédents, on posera : $\alpha = \alpha' K_d$ et $\beta=1$.

Ainsi, la fonction de LJAPUNOV V s'exprime comme suit [MIYAGI 80] :

$$V = \frac{1}{2}(x_2 + \alpha K_d x_1)^2 + \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1 - \alpha) x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du + 2K_d \sqrt{\alpha(1 - \alpha)} \int_0^{x_1} \sqrt{u g(u)} du \quad (2.122)$$

L'expression de sa dérivée s'écrit tout simplement :

$$\dot{V} = -\phi = -K_d \left[x_2 \sqrt{(1 - \alpha)} - \sqrt{\alpha x_1 g(x_1)} \right]^2 \quad (2.123)$$

La condition $\beta K_d - \alpha > 0$ et $\alpha > 0$ s'écrit alors :

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.124)$$

Notons que \dot{V} vérifie bien les critères ④ et ⑤ de LJAPUNOV précédemment cités. Maintenant, vérifions si les autres critères sont bien respectés dans une région autour de l'origine. Pour ce faire, réécrivons l'équation (2.122) sans le premier terme tel que :

$$V_1 \equiv \int_0^{x_1} H(x_1) dx_1 \quad (2.125)$$

avec :

$$H(x_1) = \alpha K_d^2 (1 - \alpha) x_1 + g(x_1) + 2K_d \sqrt{\alpha(1 - \alpha) x_1 g(x_1)} \quad (2.126)$$

Cette équation peut s'écrire aussi :

$$\begin{cases} H(x_1) = [\sqrt{\alpha K_d^2(1-\alpha)x_1} + \sqrt{g(x_1)}]^2 & \text{si } x_1 > 0 \\ H(x_1) = -[\sqrt{\alpha K_d^2(1-\alpha)(-x_1)} - \sqrt{-g(x_1)}]^2 & \text{si } x_1 < 0 \end{cases} \quad (2.127)$$

Comme $x_1 H(x_1) \geq 0$ pour $-(\pi + 2\delta_0) < x_1 < (\pi - 2\delta_0)$, alors V_1 est une fonction définie positive et par voie de conséquence la fonction V satisfait les critères ①, ② et ③ de LJAPUNOV et dès lors devient une fonction de LJAPUNOV pour être utilisée dans l'étude et l'analyse de stabilité des machines à réductance variable.

L'amélioration apportée par cette fonction de LJAPUNOV consiste à obtenir un lieu de stabilité de la machine se rapprochant de la réalité.

Par ailleurs, depuis cette fonction, très générale, on peut retrouver toute les fonctions de LJAPUNOV classiques. En effet, si on prend $\Phi=0$ dans l'équation (2.118) alors on obtient une fonction de LJAPUNOV telle que :

$$V = \frac{1}{2}(x_2 + \alpha K_d x_1)^2 + \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1-\alpha) x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du \quad (2.128)$$

et dont la dérivée est donnée par :

$$\dot{V} = -K_d(1-\alpha)x_2^2 - \alpha x_1 g(x_1) \quad (2.129)$$

En posant $\alpha = \frac{1}{n}$, on aura :

$$V = \frac{K_d}{n} \left[\frac{n}{2K_d} x_2^2 + x_1 x_2 + \frac{K_d}{2} x_1^2 + \frac{n}{K_d} \int_0^{x_1} g(u) du \right] \quad (2.130)$$

Cette fonction est équivalente à la fonction de LJAPUNOV trouvée par la méthode de POPOV. Le cas particulier où $\alpha=1$ conduit aux résultats obtenus par la méthode généralisée de ZUBOV :

$$V = \frac{1}{2}(x_2 + K_d x_1)^2 + \int_0^{x_1} g(u) du \quad (2.131)$$

Un autre cas intéressant consiste à imposer $\alpha=0$, ce qui conduit à une fonction classique d'énergie :

$$V = \frac{1}{2} x_2^2 + \int_0^{x_1} g(u) du \quad (2.132)$$

En outre, en remplaçant α par β/a et K_d par a , on aura une autre fonction classique :

$$V = \frac{1}{2} x_2^2 + \beta x_1 x_2 + \frac{1}{2} a \beta x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du. \quad (2.133)$$

2.10 - CONCLUSION

Une machine à réductance variable comporte toujours des matériaux ferromagnétiques dont la forme géométrique modifie la configuration du champ magnétique produit par un ou plusieurs bobinages.

La conversion électromécanique est possible lorsque la disposition spatiale des matériaux ferromagnétiques et des bobinages obéit à des règles topologiques bien précises. Les structures des machines qui en découlent sont très variées, ce qui permet de proposer des solutions utilisant la réductance variable à des problèmes techniques très différents comme les machines très rapides à rotor massif, les moteurs couples très lents ou les moteurs pas-à-pas ayant un grand nombre de pas par tour.

Par ailleurs, une des contraintes les plus fortes qui limitent l'emploi des MRV est la valeur élevée de leurs inductances. En effet, en alimentation sinusoïdale, le facteur de puissance est nettement inférieur à celui des autres machines synchrones et lorsqu'elles sont alimentées par un convertisseur électronique de puissance, celui-ci doit permettre la commutation des courants dans ces inductances. Le couple moyen et les couples pulsatoires dépendent en outre directement de la forme des courants d'alimentation.

L'étude et l'analyse de stabilité d'une MRV au tour d'un point de fonctionnement ont été effectuées à partir de son équation de mouvement, exprimée en grandeurs réduites, en utilisant une nouvelle fonction de LJAPUNOV donnant lieu à des régions de stabilité plus proches de la réalité que celles données par les fonctions habituellement utilisées.

C'est le modèle des machines à réductance variable à stator lisse, permettant d'évaluer les performances et l'analyse de stabilité en régime stationnaire des MRV, qui sera retenu pour la suite de l'étude. La mise en œuvre ou l'implémentation informatique de ce modèle avec les différents types de connaissances qu'il contient, en utilisant le langage PROLOG, fera l'objet du chapitre suivant qui traite le développement du système expert.

CHAPITRE 3 :

DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME EXPERT POUR LES MRV

3.1 - INTRODUCTION

Un système expert sert à résoudre des problèmes de nature symbolique par opposition à algorithmique. En d'autres termes, la puissance de raisonnement est opposée à la puissance de calcul. Les activités humaines comportent de nombreux problèmes qui peuvent être résolus par les systèmes experts.

Dans un logiciel classique, la connaissance s'exprime principalement dans le séquençement des instructions. Un programme est un ensemble d'actions savamment ou habilement ordonnées pour produire un résultat. On s'intéresse donc en priorité au "Comment". On parle souvent de connaissance procédurale pour qualifier les logiciels classiques. La qualité intrinsèque de ce type de logiciels tient à la solution algorithmique qu'il produit. Les systèmes experts s'appuient sur une vision déclarative par opposition à procédurale. On s'attache à décrire très précisément le problème et le domaine d'application, donc on s'intéresse au "Quoi". On laissera ensuite à des mécanismes logiciels le soin de raisonner sur ces informations. La Fig. 3.1 illustre à partir d'un exemple les deux types de visions susmentionnées.

Vision Procédurale	Vision Déclarative
Tant Que $i < 5$ Faire : $a = b + i/c$ Fin Tant Que.	J'ai : a, b, c. Je sais : Si a Et b Alors Problème Si $c < 5$ Alors a.

Fig. 3.1. Vision Procédurale et Vision Déclarative.

La qualité d'un système expert se traduit par sa ressemblance dans le raisonnement avec l'expert humain. Il faut, pour obtenir un système de qualité, réussir à transférer la connaissance de l'homme à la machine. Cette connaissance, qui est l'ensemble des informations, souvent très variées et relatives au domaine de l'expertise, constituera donc le cœur du système expert et c'est grâce à elle qu'il saura résoudre les problèmes qui lui seront posés. C'est en ce sens que les systèmes experts sont souvent appelés systèmes à base de connaissances : "Knowledge Based Systems".

L'un des principaux objectifs de ce chapitre consiste à décrire le plus précisément possible les concepts relatifs au formalisme de représentation retenu pour notre application système expert, baptisé SEMAREV (Système Expert pour les MACHines à RELuctance Variable), et de justifier le choix de l'outil de développement correspondant. Dans une première partie nous présentons les principaux formalismes de représentation de

connaissances et de déductions qui représentent le problème clé d'élaboration de systèmes experts. Essentiellement, le formalisme de la logique propositionnelle ou logique des prédicats du premier ordre sera développé puisque c'est le formalisme retenu et qu'on mettra en œuvre pour l'élaboration du système expert.

Ensuite, et à partir de l'étude des principaux formalismes de représentation de connaissances, nous allons justifier le choix de l'outil PROLOG comme langage d'implémentation. Nous décrivons ses capacités et ses avantages pour la réalisation de systèmes experts à base de règles de production.

Par la suite, nous caractérisons les connaissances du domaine d'un point de vue conceptuel. Nous montrons qu'il existe une grande diversité de connaissances, numériques et symboliques, sur lesquelles s'effectuent un grand nombre de traitements informatiques. Ces connaissances sont interdépendantes, partiellement définies et le plus souvent mal formalisées. Nous aborderons aussi le mécanisme d'exploitation des connaissances, en décrivant, d'une part, les principales procédures de contrôle et les principaux prédicats du système d'inférence. D'autre part, on exposera les procédures de gestion des hypothèses explicites et des règles correspondantes, donc incluant ces hypothèses dans leurs parties prémisses ou conditions. Une partie de l'interface utilisateur est consacrée à l'acquisition et au stockage dans une base de données spécialisée de nouvelles machines avec un contrôle de validité de domaines.

Enfin, nous décrivons l'architecture du système expert ainsi élaboré et l'organisation de la base de connaissances (base de faits et base de règles) qui traduit les liens entre les divers concepts.

3.2 - ACQUISITION DES CONNAISSANCES

Un système expert d'évaluation de performances et d'analyse de stabilité pour les machines à réluctance variable, doit permettre la manipulation des informations tant numériques que symboliques. En outre, il doit intégrer des connaissances relatives aux modèles des performances et de stabilité, mais aussi les hypothèses et les heuristiques régissant ces machines. La mise en œuvre d'une aussi grande variété d'informations nécessite l'utilisation d'outils adaptés souples et de haute performance.

Les techniques utilisées dans les systèmes experts semblent présenter toutes les qualités requises pour notre problème. Nous décrivons, dans ce qui suit, les éléments de programmation de ces nouvelles techniques.

Au cours de la phase d'acquisition de connaissances, dans une première étape, le cognaticien effectue des recherches bibliographiques pour apprendre le savoir du domaine.

Dans une deuxième étape c'est l'expert qui va transmettre au cognicien ses connaissances du domaine d'application et sa méthode de résolution. Il s'agit d'une étape capitale que beaucoup considèrent comme le goulot d'étranglement des systèmes experts.

L'expert ne pouvant directement transmettre son savoir à l'ordinateur, doit passer par l'intermédiaire du cognicien. L'acquisition des connaissances est cette transmission du savoir de l'expert vers le cognicien.

Il ne s'agit pas d'une simple formalité, en fait, c'est un processus très long qui demande un travail important à la fois à l'expert et au cognicien. Ils vont rencontrer toutes les difficultés liées à une communication orale très riche comme le montre la Fig. 3.2 ci-dessous.

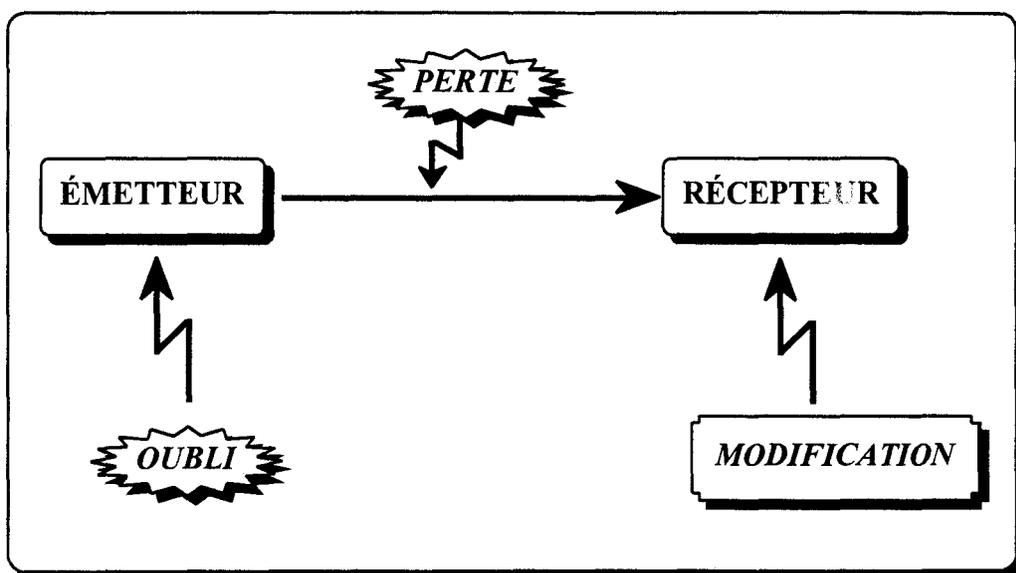


Fig. 3.2 Les Écueils de la Transmission des Connaissances.

Le rôle de l'émetteur sera joué par l'expert. Il va devoir parler d'un sujet étendu et complexe pour lequel il a parfois peu l'habitude de parler. On a donc un grand risque d'oubli ou d'omission d'informations qu'il considère comme évidentes.

Le cognicien, qui joue le rôle du récepteur, va devoir assimiler un grand nombre d'informations sur un sujet inconnu. On risque la modification d'information de sa part.

Enfin, tous deux utilisent un médium, la parole, qui est très puissant mais en même temps qui facilite le risque de perte ou de modification de l'information.

3.2.1 - Processus d'Acquisition des Connaissances

Le processus d'acquisition des connaissances est un processus itératif. Il n'y a donc pas une phase d'acquisition des connaissances qui débute à un moment précis du projet et qui se termine lorsqu'on estime que l'on a acquis la connaissance. En réalité, l'acquisition des connaissances est présente tout au long du projet avec, bien entendu, une période où on y consacre un temps plus important.

Les étapes d'acquisition de la connaissance et de modélisation ne sont pas indépendantes. On ne peut pas effectuer une étape sans s'appuyer sur l'autre. Il faut intégrer les besoins de chaque phase pour rechercher les informations pertinentes. La formalisation de la connaissance s'appuie sur la phase d'analyse, mais est influencée par les contraintes d'implantation machine. Ainsi, le processus complet de transfert de connaissance est un va-et-vient permanent entre chacune de ces étapes.

Le domaine des systèmes experts, par sa complexité, ne permet pas toujours d'appliquer directement les méthodes classiques du génie logiciel : spécifications, analyse, codage et validation. Toutes ces étapes existent, mais ne sont pas réalisées les une après les autres. On travaillera en profondeur d'abord, c'est à dire de l'analyse à la réalisation, sur un domaine réduit, avec des retours en arrière comme illustré par la Fig 3.3.

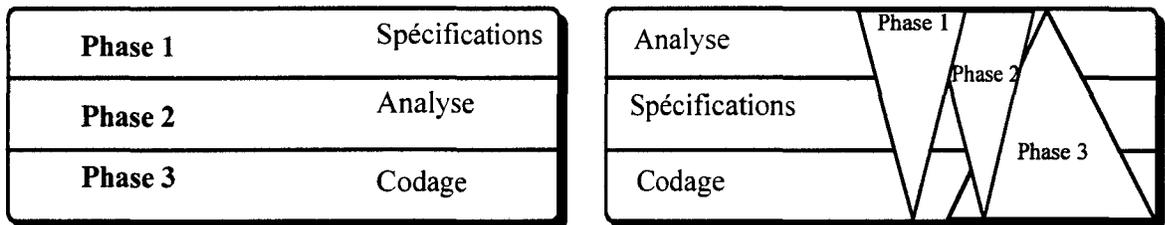


Fig. 3.3. Développement Classique et Développement Système Expert.

C'est au cogniticien de piloter la phase d'acquisition des connaissances. Pour piloter cette phase vers le succès Il faut quelques précautions qui éviteront des errements néfastes au bon déroulement du projet et à la motivation des différents acteurs.

3.2.2 - Rôle du Cogniticien

Dans la majorité des applications actuelles, la réalisation d'un système expert ne met pas directement en présence le(s) spécialiste(s) et l'outil informatique.

Trois raisons essentielles expliquent ce choix dans l'organisation d'un projet système expert :

- le manque de disponibilité des experts,
- la nécessité d'une bonne connaissance des techniques de l'intelligence artificielle,
- la nécessité d'un "recul" du spécialiste vis-à-vis de son domaine d'expertise.

La conception et la réalisation d'un tel système sont les fruits d'une collaboration étroite entre le(s) spécialiste(s) du domaine et un spécialiste du transfert de connaissances appelé cogniticien. De la réussite de cette étape dépend en grande partie le succès du projet. Le rôle du cogniticien nécessite évidemment des compétences en IA mais également en psychologie et est important au cours de la phase d'élaboration du produit comme le montre la Fig. 3.4. Il dirige le projet et fixe les différentes étapes nécessaires à sa réalisation.

Par contre, il semble souhaitable que l'expert puisse ensuite gérer lui-même l'évolution du produit en fonction de l'évolution de ses connaissances et ainsi en assurer la maintenance et la mise à jour.

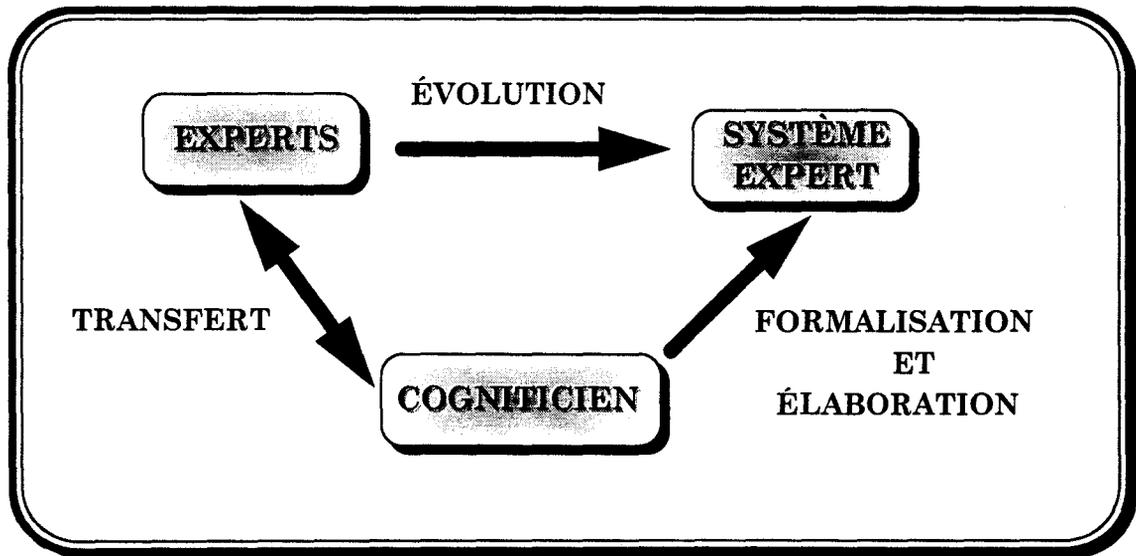


Fig. 3.4. Élaboration et Évolution du Système Expert.

3.2.3 - Méthodologie de Transfert

Une des difficultés majeures de l'acquisition des connaissances réside dans le fait que beaucoup de personnes ont tendance à penser que la connaissance est uniforme. Dans ce cas, le savoir d'un expert est considéré comme un ensemble de fragments de

connaissance et le problème du transfert consiste alors à extraire la connaissance par fragments.

Une approche plus réaliste du problème est de reconnaître au contraire que même au plus petit domaine d'expertise sont associés plusieurs types de connaissance. Ainsi, à chaque type de connaissance, correspond une méthode d'acquisition. Maintenant, on va présenter les trois étapes principales qui composent le transfert de connaissances.

3.2.3.1 - Étape de Mise en Œuvre

Au cours de cette étape, s'établit un double échange d'informations :

□ *Cogniticien* ⇨ *Expert* : En répondant à la question de l'expert "Qu'est-ce qu'un système expert ?", le cogniticien explicite les caractéristiques, les structures, les objectifs et les limites des systèmes experts.

□ *Expert* ⇨ *Cogniticien* : En répondant à la question du cogniticien "Pourquoi envisager un système expert ?", l'expert explique le pourquoi de l'utilisation d'un tel système, son rôle et sa place dans l'environnement de travail des spécialistes.

3.2.3.2 - Étape d'Observation et d'Apprentissage

Cette étape essentielle peut être longue et très délicate. Il s'agit pour le cogniticien de s'imprégner de l'univers de travail de l'expert, d'observer son comportement en face de situations réelles, d'obtenir des références écrites sur tel ou tel point, de compléter son apprentissage en interrogeant l'expert. Le cogniticien essaie alors d'extraire le savoir de l'expert, d'acquérir les notions de base, d'obtenir un niveau de connaissance minimum, connaissances du "jargon" de l'expert, des relations liant les éléments du domaine d'expertise, des situations types et des comportements généraux.

Cette étape est délicate car elle ne débouche sur aucun résultat directement exploitable, mais elle est nécessaire puisqu'elle permet au cogniticien d'acquérir un ensemble de connaissances de base ou élémentaires à partir duquel vont se développer les connaissances d'expertise proprement dite. Elle permet également de mettre en évidence les caractéristiques générales du comportement du spécialiste lors de la résolution d'un problème.

En conclusion de cette étape, le cogniticien établit les caractéristiques principales de l'application en fonction de critères concernant le domaine d'expertise et l'expertise en elle-même. A partir de ces données et des objectifs du système le cogniticien choisit le formalisme de représentation des connaissances le mieux adapté.

3.2.3.3 - Étape de Dialogue

Le cogniticien, qui possède désormais un niveau de connaissance élémentaire, peut de façon plus précise dialoguer avec l'expert afin de comprendre ses mécanismes de raisonnement, de mettre en évidence les connaissances d'expertise et de justifier le pourquoi de certaines actions et déductions. Donc le cogniticien, au cours de cette étape, complète de façon explicite le domaine et les connaissances d'expertise.

3.2.4 - Difficultés de Transfert

Trois obstacles majeurs doivent être surmontés lors du transfert des connaissances, ils mettent en jeu la compétence psychologique du cogniticien et sont :

- ❑ Le blocage psychologique de l'expert qui craint de délivrer un savoir qui représente des dizaines d'années d'expérience et de se sentir ainsi "dépouillé". Il peut également ressentir une gêne, voire un sentiment de frustration en s'apercevant que le système produit en partie ses connaissances et simule partiellement son raisonnement. Montrer les limites du système peut permettre d'éviter ce blocage.
- ❑ La tentation plus ou moins consciente du cogniticien de se substituer à l'expert peut également être à la base de conflits rendant ensuite très difficile le transfert des connaissances.
- ❑ La difficulté d'analyser des connaissances qui ne s'appuient pas sur des références écrites et bien formalisées mais sur l'expérience et l'intuition développées au fil des ans. Ainsi, du fait même de sa compétence l'expert a du mal à rendre compte d'informations qu'il utilise dans certains cas et à expliciter certaines étapes de son raisonnement : c'est le problème des informations implicites.

3.3 - REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES D'EXPERTISE

Le développement des techniques de l'intelligence artificielle, notamment pour la représentation des connaissances, au cours des dix dernières années, a rendu possible la construction effective des systèmes experts.

L'élément de base d'un système expert est la connaissance. Or celle-ci est très riche, variée, souvent multiforme et ambiguë ; il faut pourtant la capturer pour la mettre dans un système informatique. Il existe un impératif de formalisation, car les capacités de compréhension d'un ordinateur sont loin d'être aussi étendues que celles d'un être humain. Un mode de représentation des connaissances est donc un moyen d'expression de la réalité.

En ce sens, il s'agit d'un langage. En regard de l'utilisation qui est faite de ces modes de représentation, on peut les comparer aux algorithmes en informatique classique. Ils permettent de décrire le fonctionnement futur du système de façon suffisamment détaillée pour lever toute ambiguïté, mais aussi de façon suffisamment abstraite pour s'affranchir de toute contingence ou contrainte matérielle ou logicielle.

À ce stade, on peut se poser la question suivante : Pourquoi disposons-nous de différents modes de représentation des connaissances ?

La représentation des connaissances est un domaine très ouvert où il n'y a pas de solutions totalement satisfaisantes. Il faut donc faire des choix qui ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Dès les premiers balbutiements de l'informatique, on a été confronté aux problèmes de communication avec la machine. Comme les travaux confiés aux ordinateurs sont de plus en plus complexes, la difficulté de faire percevoir le monde réel à la machine n'a fait que croître.

L'informatique classique s'est attachée à décrire les traitements à exécuter sur les données, au moyen d'algorithmes. Ces données sont échangées par plusieurs programmes ou procédures effectuant une tâche bien précise, et elles sont successivement transformées. On dit souvent que l'informatique classique adopte une vision procédurale.

L'intelligence artificielle, ayant des problèmes différents à traiter, a choisi une vision déclarative. Le langage PROLOG et les systèmes à base de règles de production sont deux représentants de cette vision. On s'attache d'abord à décrire la réalité et les connaissances nécessaires à la résolution du problème avant de laisser, à des mécanismes de raisonnements automatiques, le rôle de déterminer la solution.

Entre la vision exclusivement procédurale ou déclarative, il faut placer le mode de représentation à base d'objets qui rassemble, dans une même entité (l'objet), des notions déclaratives et procédurales.

On va présenter dans ce qui suit les principaux modes ou formalismes de représentation de connaissances utilisés actuellement en intelligence artificielle. Une représentation des connaissances est un cadre, un modèle, pour représenter la réalité conformément à la Fig. 3.5.

Ce que l'on vise principalement avec ces formalismes, c'est la description des connaissances du monde réel, dans un système formel et ceci dans le but de raisonner et de faire des déductions. Bien que chacun préfère tel formalisme ou tel autre, on peut cependant dire qu'il n'en existe pas d'idéal ou d'universel, ce choix, encore entaché de subjectivité aujourd'hui, conditionne celui des outils de développement.

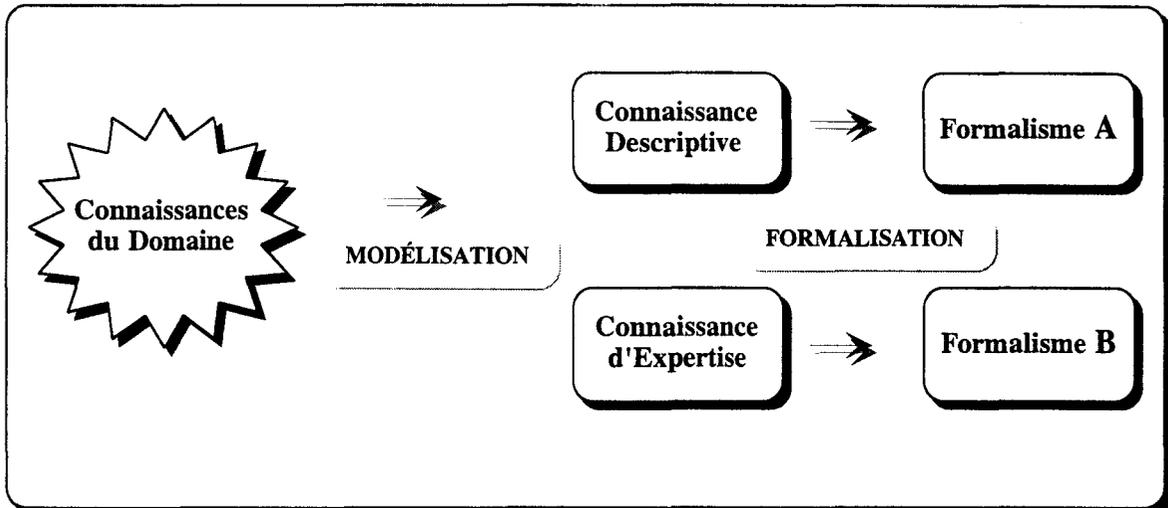


Fig. 3.5. Les Différentes Étapes de la Représentation de Connaissances.

Le concept de connaissance est très différent du concept d'information. La connaissance apparaît comme une information qui a été traduite, triée, transformée et mémorisée. C'est la masse des connaissances accumulées par un expert qui fait sa force.

D'une manière générale, la connaissance d'un domaine peut se caractériser par :

- ❑ l'acquisition d'un maximum d'informations sur le domaine,
- ❑ la transformation de ces informations en connaissances stockées dans la mémoire sémantique,
- ❑ le savoir exploiter à bon escient ces connaissances ce qui permet de restreindre l'espace des solutions lors de la recherche d'un diagnostic et d'optimiser le raisonnement.

3.3.1 - Calcul Logique

Ce mode de représentation est basé sur un domaine important des mathématiques : la logique. Il utilise plus particulièrement le calcul propositionnel et le calcul des prédicats. La logique est souvent utilisée en conjonction avec des systèmes à base de règles de production.

3.3.1.1 - Calcul Propositionnel

En logique d'ordre zéro, la description des connaissances se fait sous forme de propositions qui peuvent être vraies ou fausses.

Exemple : le bureau est rectangulaire : Vrai,
la table a quatre pieds : Vrai.

Ces propositions peuvent être liées à des connecteurs logiques : \cap (Et), \cup (Ou), $\bar{}$ (Non), \Rightarrow (Implique) et des parenthèses. Les propositions et les connecteurs doivent être assemblés selon une syntaxe bien précise qui produit ainsi des formules correctement établies. La composition des propositions peut aussi se construire à l'aide de tables de vérité. Les règles d'inférence permettent d'effectuer un certain nombre de déductions sur les propositions et sont à la base des mécanismes de raisonnement. On en distingue deux :

- le modus Ponens : $(X \text{ Et } (X \Rightarrow Y) \Rightarrow Y)$,
- le modus Tollens : $(\bar{Y} \text{ Et } (X \Rightarrow Y) \Rightarrow \bar{X})$.

La logique permet de décrire une situation et des règles de comportement assez aisément.

3.3.1.2 - Calcul des Prédicats

Il s'agit d'une extension du calcul propositionnel. Il permet de parler d'objets et de relations entre objets. En effet, l'écriture précédente ne permet pas de généraliser une proposition. Les extensions portent sur l'alphabet et les axiomes. On introduit :

- des constantes (a, b, c),
- des variables (X, Y),
- des prédicats (P, Q),
- des quantificateurs (\forall , \exists),
- des virgules.

Les constantes et les variables constituent les arguments. Une variable peut être substituée par n'importe quel élément constant. Un prédicat est composé d'arguments, qui lui sont associés, et suivant quoi il retournera une valeur vraie ou fausse.

Pour le calcul de prédicats d'ordre 1, appelé aussi logique d'ordre 1, seules les variables peuvent être quantifiées.

Pour pouvoir raisonner sur les connaissances décrites en logique, il faut développer des algorithmes de démonstration de théorèmes. Ces méthodes sont en général basées sur le modus Ponens ou Tollens, ou sur le raisonnement par l'absurde. La difficulté de conception d'outils de développement performants basés sur la logique réside dans ces algorithmes. Un outil très puissant utilise la logique de premier ordre : PROLOG.

Les avantages d'utilisation de la logique sont la puissance de description pour certains problèmes, les solides bases théoriques et la séparation totale entre la description du problème et résolution des théorèmes. En contrepartie, des systèmes basés sur la logique ne permettent pas de contrôler les mécanismes de raisonnement et sont d'une syntaxe très contraignante.

3.3.2 - Formalisme de Règles de Production

Le formalisme de représentation de connaissances d'expertise qu'on a choisi est celui des règles de production. Cette approche permet :

- une expression déclarative et modulaire des différents types de connaissances,
- un raisonnement de type "Heuristique",
- de ne pas pénaliser trop fortement les capacités du système.

Il est intéressant de noter que ce dernier point est strictement lié à l'aspect naturel du formalisme des règles de production. Les travaux effectués en psychologie cognitive sur la modélisation arrivent à une méthodologie similaire en montrant l'intérêt d'un tel formalisme.

Simuler un raisonnement ou établir un diagnostic consiste à exploiter, d'une manière intelligente, les fragments élémentaires de connaissances que constituent les règles de production, c'est la démarche cognitive.

Le formalisme de règles de production exprime des connaissances sous la forme : $S \Rightarrow A$, où "S" décrit une situation et "A" l'action à entreprendre si "S" est vérifiée. D'une façon plus précise, "S" respectivement "A" est représenté par une liste de propositions appelée prémisses respectivement conclusions. Chacune de ces propositions traduit une connaissance concernant des éléments du domaine.

Les règles sont utilisées dans des systèmes de production, proposées en premier par POST en 1943. Une règle de production est la représentation d'une action conditionnelle de la forme :

Si <Prémisse> **Alors** <Action>.

L'ensemble des règles de production est organisé sous forme d'un réseau, en effet la conséquence d'une règle peut être l'antécédent d'une autre règle. Toutefois, les règles ne font pas directement référence entre elles, et permettent ainsi de représenter la connaissance sous forme de petits modules indépendants. En outre, elles formalisent bien le raisonnement humain, fondé souvent sur des règles de type antécédent conséquent, notamment d'après NOWELL qui pense que ce formalisme permet de représenter le transfert entre la mémoire à court terme et celle à long terme chez l'homme.

Les systèmes de productions utilisent comme schéma d'inférence le Modus Ponens :

Si P **et** **Si** (P \Rightarrow Q) **Alors** Q.

L'espace de travail ou la base de faits contient l'ensemble de faits que le programme (moteur d'inférence) a pu déduire à un instant donné.

Si le langage de représentation est basé sur la logique des propositions donc d'ordre 0, les faits correspondent à des assertions qui ne peuvent prendre que les valeurs "vrai" ou "faux".

La logique du premier ordre permet l'introduction de variables et de quantificateurs. Au lieu de ne se préoccuper que de la valeur de vérité des assertions, on cherche à représenter des états pour des objets spécifiques. Le prédicat est une description d'un objet, par exemple Homme (SOCRATE), signifiant que SOCRATE est un homme, description qui peut être vraie ou fausse.

L'interpréteur cherche à instancier (spécification de valeurs particulières) les variables de certaines règles pour les mettre en accord avec les faits connus, c'est la phase d'unification ou filtrage. Toutefois, la présence de vraies variables peut poser des problèmes pour l'unification, on utilise donc souvent une restriction de la logique des prédicats : la logique dépendant du domaine (ordre 0⁺), dans laquelle les arguments des prédicats ne peuvent prendre de valeurs que dans un sous-ensemble prédéfini.

Le système fonctionne selon un cycle de séquences élémentaires qui sont :

- *la détection* : elle détermine les règles et les faits pertinents au moyen d'unification ou filtrage (*Pattern-Matching*),
- *le choix* : c'est la sélection parmi les règles applicables de celle qu'il est préférable de déclencher après ordonnancement,
- *l'exécution* : l'exécution de la partie action suivant les substitutions trouvées dans la séquence détection et la mise à jour de l'espace de travail et enfin le retour à la détection si on n'a pas atteint le but.

Le fonctionnement décrit ci-dessus correspond à une stratégie "en avant" lorsque, à partir d'une situation initiale, on applique les règles ayant cette situation dans la partie prémisses pour dériver des situations atteignables. L'autre stratégie applicable, dite "en arrière", part du but et applique les règles ayant ce but dans la partie action. Le système considère alors les parties prémisses de ces règles comme autant de sous-buts à vérifier.

Lors de la séquence choix, la stratégie ordonnancement des règles candidates et de résolution des différents conflits peut faire intervenir un contrôle par méta-règles (règles sur les règles). Ces méta-règles opèrent sur les règles et permettent de les sélectionner selon divers critères. Enfin, pour permettre la manipulation d'informations incertaines, des coefficients de plausibilité ou de certitude peuvent éventuellement être associés aux faits et aux règles.

Les systèmes experts utilisant ce type de représentation sont :

- MYCIN : développé en 1974 par SHORTLIFFE pour le diagnostic et le traitement de méningites en identifiant les germes responsables de l'infection et en proposant une thérapeutique,

- SPHINX : développé en 1980 à Marseille, il permet la consultation de haut niveau dans des applications à visée diagnostique ou thérapeutique.

Le mode de représentation à base de règles de productions est le mode le plus utilisé actuellement. La plupart des systèmes experts l'utilise. Un tel système est un ensemble de règles qui sont activées par un mécanisme de raisonnement appelé moteur d'inférence. Une règle est composée de deux parties : la condition ou la prémisse et l'action ou la conclusion.

Si Condition(s) Alors Action(s).

3.3.2.1 - Présentation Générale

Les règles de production permettent de représenter la connaissance sous forme de petits modules indépendants.

Exemple :

R ₁ :	Si Vent Fort Alors Drapeau Rouge
R ₂ :	Si Vent Faible Alors Drapeau Vert
R ₃ :	Si Drapeau Rouge Alors Non Bain.

L'ensemble des règles est rassemblé dans la base de connaissances. Les règles actionnées par le moteur d'inférence travaillent sur des faits. Les faits, rassemblés dans une base de faits, sont en quelque sorte les données sur lesquelles travaillent les règles. Ces faits peuvent être des faits introduits à la création du logiciel ou des faits actualisés propres à une situation.

Le moteur d'inférence est le mécanisme de raisonnement. À ce titre, il apporte l'aspect dynamique au système expert. Dans une première approche, on peut considérer les règles comme une description du domaine d'expertise et le moteur d'inférence comme étant un simulateur du raisonnement.

En réalité, pour faire correspondre mécanisme de raisonnement et raisonnement réel de l'expert, on peut créer un certain nombre de règles appelées métarègles qui vont influencer le comportement du moteur.

Les métarègles constituent une partie de la métaconnaissance. Un moteur d'inférence travaille en deux étapes : l'étape de sélection qui consiste à choisir la règle applicable et à évaluer sa partie condition et l'étape d'exécution qui se déclenche si la condition est satisfaite et les actions présentes dans la conclusion sont exécutées.

Le moteur d'inférence autorise en général deux stratégies de raisonnement :

- le chaînage avant, ou stratégie dirigée par les faits,
- le chaînage arrière, ou stratégie dirigée par les buts,

3.3.2.2 - Moteurs d'Inférence Associés

La différence de puissance entre les systèmes à bases de règles de production se joue au niveau de la sémantique et au niveau des mécanismes d'inférence. La sémantique autorise des notions plus ou moins riches dans les parties prémisses conclusions. Les expressions autorisées suivent des règles inspirées de la logique des propositions et le moteur satisfaisant ces règles sera qualifié de moteur d'ordre 0.

Dans les moteurs d'ordre 0+, les parties prémisses et conclusions ne contiennent plus des propositions, mais des triplets (objets, attribut, valeur) ou des attributs valués. Le mécanisme d'inférence, constitué essentiellement par la phase d'évaluation, est composé de plusieurs étapes :

- ☆ la phase de restriction pour sélectionner un sous ensemble de règles de la base de connaissances,
- ☆ la phase de filtrage où les prémisses seront évaluées,
- ☆ la phase de résolution de conflit pour choisir les règles à exécuter parmi les règles éligibles ;

3.3.3 - Réseaux Sémantiques

Un réseau sémantique est un ensemble de points appelés nœuds reliés par des arcs orientés où les nœuds représentent des concepts et les arcs orientés des relations binaires. Les nœuds peuvent être de différentes natures : simples prédicats ou structures de sous réseaux.

Il existe également différents types de relations : le lien "Est-Un" qui traduit une relation d'appartenance d'un individu à un ensemble, le lien "Est-Une-Sorte-De" entre deux ensembles peut traduire une généralisation ou une spécialisation, le lien "Est-Un-Élément-De" représentant une appartenance ou une abstraction, mais d'autres relations, causales, associatives et temporelles sont possibles.

Chaque objet est représenté par un simple nœud et toutes les assertions relatives à cet objet sont directement accessibles via les arcs connectés à ce nœud. Il n'existe pas de sémantique formelle dans les réseaux sémantiques. Une signification est associée à une représentation seulement par la nature des procédures qui la manipulent.

Conséquemment, il existe différentes procédures pour permettre les inférences. Enfin, le mécanisme de raisonnement utilisé est le plus souvent le pattern-matching ou filtrage.

Un exemple de systèmes experts utilisant ce type de représentation est CASNET qui a été développé par WEISS et KULIKOWSKI et fonctionnant comme un consultant pour le diagnostic et le traitement des glaucomes.

Ce mode de représentation des connaissances est issu des travaux en psychologie sur la modélisation des mécanismes de mémorisation. Il a fait aussi l'objet d'études en Intelligence artificielle, notamment pour résoudre des problèmes de reconnaissance de langue naturelle. Aujourd'hui on rapproche souvent les réseaux sémantiques de la représentation à base de frames, plus largement utilisée.

Un réseau sémantique peut représenter des objets, des concepts ou des événements par des nœuds. Les arcs représentent les relations préalablement définies entre les entités.

Deux types de relations sont souvent utilisés :

- la relation ISA (est un) pour classer différents types d'objets,
- la relation HASPART (possède) pour affecter des propriétés aux différentes entités.

Une des propriétés intéressantes de ces relations est la notion d'héritage. En effet, les différents liens ISA permettent de représenter une hiérarchie. Ce qui est intéressant dans la notion d'héritage est que les entités se situant dans le niveau le plus bas de la hiérarchie héritent des propriétés des entités supérieures auxquelles elles sont rattachées.

La Fig. 3.6A introduit un réseau sémantique concernant les véhicules avec les deux types de liens et illustre la notion d'héritage.

Les réseaux sémantiques ont été utilisés dans plusieurs applications systèmes experts, notamment dans le système PROSPECTOR en géologie. Ils ont, en outre, l'avantage de la clarté, de la lisibilité et de la facilité d'écriture. Ils sont bien adaptés aux problèmes fortement hiérarchisés. Malheureusement, ils manquent d'efficacité au niveau des mécanismes de raisonnement, et de méthode au niveau de la représentation (absence d'une écriture standard).

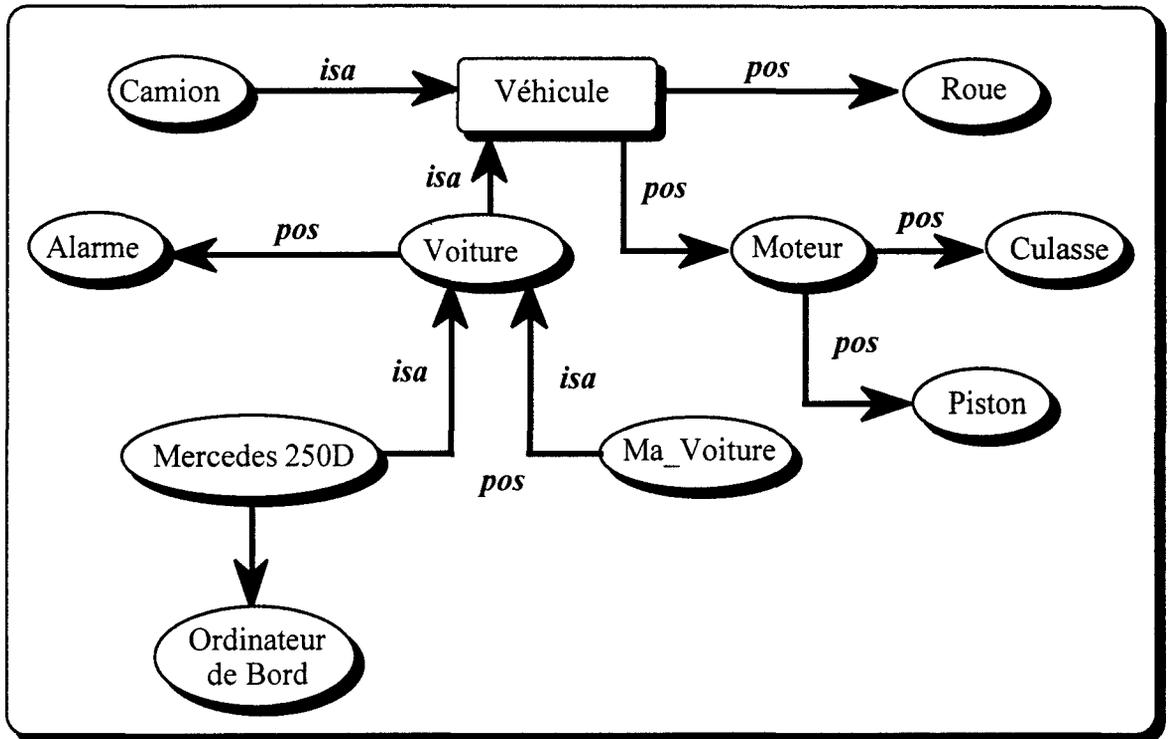


Fig. 3.6A. Réseau Sémantique pour un Véhicule.

3.3.4 - Cadres Sémantiques ou “Frames”

La théorie des cadres sémantiques ou “frames” est due à MINSKY qui considère que la connaissance de l'être humain n'est pas disposée en vrac, mais au contraire elle est structurée autour d'unités d'informations.

Ainsi, face à une nouvelle situation, un individu sélectionne en mémoire une structure déjà connue qu'il peut identifier à l'aide de changements de détails par rapport à la situation actuelle, puis en se basant sur cette situation reconnue, il peut alors débiter un raisonnement. L'intelligence proviendrait dans ce cas de l'utilisation d'une grande quantité de connaissances spécialisées et non pas de l'emploi de mécanismes d'inférence très développés.

Le cadre sémantique ou objet est une structure de données complexes incluant, à la fois, des informations déclaratives et procédurales. Un cadre est composé d'attributs (Slots), chacun d'eux étant en rapport avec un aspect particulier de la description de l'objet représenté. Ces attributs peuvent eux-mêmes faire référence à d'autres cadres sémantiques comme une généralisation de réseaux sémantiques à des objets complexes.

À chaque attribut sont attachés des descripteurs ou facettes dont les deux principaux types indiquent la manière d'attribuer une valeur à l'attribut (réaliser l'attribut) et les tâches à accomplir lorsque l'attribut a été réalisé.

Les descripteurs du premier type peuvent être soit des valeurs par défaut, soit des domaines de valeurs autorisées, soit encore des procédures (réflexes "Si-Besoin") permettant d'obtenir la valeur par calcul ou interrogation. Les tâches à accomplir sont également souvent représentées par des attachements procéduraux (réflexes "Si-Ajout").

Ces attachements peuvent utiliser des listes locales de règles de production et correspondent respectivement aux raisonnements en arrière et en avant dans les systèmes à règles de production.

L'ensemble des cadres ainsi représentés est souvent organisé hiérarchiquement à l'aide de liens généralisation/spécialisation "Est-Une-Sorte-De" et de concept/instance "Est-Un". Ces liens permettent une classification des objets et l'héritage de valeurs depuis le concept le plus général.

Ainsi, le prototype personne de la Fig.3.6B comprend toutes les propriétés de toute entité de type "personne" : son nom, son sexe, son âge, sa taille. Ce prototype peut être enrichi par ajout de propriétés, par exemple "conjoint".

Personne :	
Nom :	Chaîne de Caractères
Prénom :	Chaîne de Caractères
Sexe :	Élément de [M,F]
Année de Naissance :	Entier
Taille :	Réel

Fig. 3.6B. Définition d'un Cadre Définissant un Concept.

Le modèle peut encore se compliquer par la possibilité de typer les propriétés de prototypes, par des références à d'autres frames dits de définition. De cette manière, la propriété "nom", de type chaîne de caractères, pourrait être typée par un frame "mot" de propriété "nature" et de valeur "chaîne de caractère" et dont le prototype serait le frame "propriété". Le réseau ainsi constitué permet non seulement de rendre compte des entités et des interrelations, mais aussi du codage même des propriétés sous forme de chaînes de caractères, d'entiers ou réels.

Le raisonnement consiste à reconnaître dans le monde des objets connus, l'objet le plus précis et le plus proche de la situation donnée. Cet objet permet de compléter la description de la situation initiale et les informations supplémentaires qu'il apporte doivent être les réponses à toutes les questions possibles.

Le processus d'identification utilisé est le pattern-matching ou filtrage, qui permet d'évaluer la proximité de deux cadres sémantiques. Une facette "poids" attribuée à chaque attribut indique son importance et permet l'utilisation de la notion d'importance relative des attributs dans un concept lors du filtrage.

Le contrôle est centralisé pour traiter des questions venant de l'extérieur. Un processus analyse la requête et la traduit sous forme d'un filtre utilisé ensuite par le processus de filtrage. Sinon, le contrôle est réparti entre les objets au niveau des attachements procéduraux, les cadres sémantiques intervenant ayant le contrôle à tour de rôle, notamment pour les opérations d'instanciation ou d'héritage de valeurs (effectués par les réflexes "Si-Besoin" et "Si-Ajout").

PIP (Present Illness Program) est un système expert, destiné à comprendre l'histoire d'un malade atteint d'une pathologie rénale, dans lequel la connaissance est représentée sous forme de cadres sémantiques organisés hiérarchiquement.

3.3.5 - Représentations Orientées Objets

Ces représentations possèdent plusieurs noms suivant les systèmes qui en reprennent le principe : frames, objets structurés, formes-objets, schémas, prototypes ou "units". La notion d'objet est une entité caractéristique à laquelle on attache une connaissance déclarative et procédurale. Chaque objet a une existence propre et possède des données qui le définissent, son action se fait grâce aux procédures qui lui sont attachées.

Un système à frames se caractérise par les propriétés de ces frames et par le réseau qui lie les différents objets entre eux. On peut considérer un système à base de frames comme un réseau sémantique dont les nœuds ont des propriétés très développées.

Une frame prise isolément se décompose en attributs (ou Slots) qui possèdent eux mêmes différentes propriétés appelées facettes. L'objet se décomposera donc en attributs, facettes et contenu de facettes. Il existe beaucoup de possibilités d'implantation de systèmes à base de frames où l'on fait varier entre autres la nature des facettes.

L'inférence dans un réseau de frames consiste à utiliser de façon concertée deux mécanismes : l'attachement procédural et le mécanisme d'héritage. Classiquement, le système va d'abord chercher à déclencher les facettes locales avant de procéder par héritage. Certains objets devront être créés pour faire face à une situation nouvelle, ce mécanisme de création s'appelle instanciation.

L'objet qui sert de référence s'appelle la classe, et celui qui est produit l'instance. L'objet instance possède toutes les propriétés de la classe qui l'a engendré et par héritage celle des classes auxquelles il est relié.

Maîtriser le comportement à base de frames en régime dynamique demande un effort important de la part du concepteur car il y a beaucoup de mécanismes qui rentrent en jeu. En contrepartie, les possibilités sont immenses.

Les systèmes utilisant des règles dans un environnement d'objets s'appellent systèmes hybrides, où les règles se trouvent dans les facettes procédurales et peuvent porter sur les objets, les attributs ou les facettes.

Les systèmes à base de frames permettent de décrire un problème de façon très réaliste, surtout si les entités sont bien définies et classées hiérarchiquement. En contrepartie, le mode de représentation à base de frames a l'inconvénient d'être plus difficile à maîtriser.

Les premières applications sont difficiles à construire car la façon de les concevoir s'éloigne beaucoup des règles classiques de programmation. Néanmoins, les systèmes à base de frames se développent actuellement très rapidement et ont tendance à intégrer des possibilités liées au mode de représentation à base de règles de production.

3.4 - OUTILS D'IMPLEMENTATION

L'avènement récent de ce qu'il est convenu d'appeler les techniques informatiques de la nouvelle génération, met le programmeur non expérimenté face un problème de choix très difficile voire épineux. En effet, la jeunesse des concepts manipulés a donné le jour à une très grande variété de langages ou même des programmes générateurs.

Si ces différents outils reposent sur les mêmes idées de base, il n'en est pas moins vrai que les différences dans les implémentations amènent souvent à des fonctionnalités, voire même à une souplesse d'utilisation, très variables.

Dans ce qui suit, on essaiera de justifier notre choix du langage de programmation PROLOG. On exposera les éléments et les raisons, qui au début de notre travail, nous ont amenés à trancher en faveur de cet outil de programmation.

L'intelligence artificielle, et plus particulièrement les systèmes experts proposent de nombreux outils. Ceux-ci peuvent être classés grossièrement en trois catégories.

La première est celle des générateurs de systèmes experts, qui sont des progiciels mettant à la disposition de l'utilisateur des modèles de la connaissance et des stratégies de résolution, généraux et plus ou moins paramétrables tels que ART, KEE, NEXPERT-OBJECT.

La deuxième classe regroupe les langages de programmation de bas niveau permettant des implémentations performantes et bien finalisées tels que LANGAGE C, PASCAL, FORTRAN.

La dernière classe est celle des outils de prototypage qui propose des concepts évolués pour développer et implémenter rapidement ses propres modèles de la connaissance ainsi que le programme (moteur d'inférence) qui les manipule. C'est le domaine privilégié des langages incrémentaux, souvent interprétés, qui, bien que d'assez bas niveau, proposent des couches plus évoluées parfaitement intégrées tels que PROLOG, LISP, SMALLTALK.

Les générateurs de systèmes experts permettent de réaliser des prototypes ou même des applications industrielles en s'affranchissant en grande partie des aspects informatiques. L'utilisateur peut alors se consacrer davantage à l'aspect cognitif de son problème (extraction et analyse de la connaissance).

Cependant, il nous a semblé au début de notre travail, que le formalisme sous-jacent de ces générateurs suggère une approche qui, malheureusement, n'est pas nécessairement adaptée au problème à traiter, et dont nous devons nous affranchir pour rester assurément objectif.

Inversement, dans le cas des langages généraux, les outils de base étant souvent absents, tout est à la charge du concepteur. Notre objectif n'étant pas la programmation en elle-même, nous avons abandonné cette voie.

Les langages incrémentaux sont particulièrement adaptés au développement de maquette ou prototype. De plus, tout en donnant accès à des outils conceptuels évolués (concepts de messages, de moteur d'inférence paramétrables, de traitement symbolique et numérique de l'information et d'objets), leur structure incrémentale permet un contrôle à tous les niveaux.

Cette possibilité de contrôle nous a semblé prépondérante pour une approche saine et objective de notre problème. L'autre aspect important de ces outils est l'ouverture vers d'autres langages évolués [BRASSARD 89]. En effet, le système expert peut inclure des programmes développés sous d'autres langages évolués voire même des connexions avec d'autres logiciels.

Nous avons opté pour PROLOG, langage totalement déclaratif, car c'est un langage logique, non déterministe, dynamique et utilisant une véritable notion de variable ce qui permet de désigner des objets inconnus qu'on recherche. Ces variables peuvent servir à construire et à manipuler des objets non complètement spécifiés, et grâce au mécanisme d'unification intégré à PROLOG, sont un moyen de calcul symbolique puissant et efficace.

La logique de PROLOG découle du fait que ce qu'on écrit est déclaratif, qui possède un sens indépendamment de tout système de calcul, et peut être vu comme une liste d'axiomes décrivant un problème [DELAHAYE 88]. Le non-déterminisme a pour origine le mécanisme de raisonnement inclus dans le noyau de PROLOG, exploité, il permet très facilement de programmer des recherches arborescentes très complexes.

L'aspect dynamique de PROLOG se rencontre dans la récursivité, les listes, les arbres, les variables et la Base de données, et se traduit par la possibilité de disposer d'une grande quantité de mémoire à chaque instant pour de multiples usages.

PROLOG peut donc être considéré comme un moteur d'inférence avec variables fonctionnant en chaînage arrière (d'un but il déduit d'autres but, qui eux-mêmes donnent d'autres buts).

Par ailleurs, le type des connaissances traitées, lors du processus d'évaluation des performances ou d'analyse de stabilité des machines à réluctance variable, étant très structuré et qui peut facilement être exprimé sous forme de règles de production, et de ce point de vue, l'utilisation de PROLOG nous a semblé plus simple et moins contraignante que les autres outils de développement de systèmes experts.

3.5 - OBJECTIFS DU PROJET PILOTE SYSTÈME EXPERT POUR LES MRV

Pour un premier projet de système expert, il vaut mieux choisir un domaine d'application très limité, peu complexe, en l'occurrence un type particulier de machines électriques : les machines à réluctance variable, et mener de bout en bout rapidement.

Il très important dans un premier projet, ou *projet pilote*, d'acquérir le maximum d'expérience tout en réalisant un système opérationnel qui pourra être montré en exemple. Par conséquent, il est imprudent de se lancer dans un projet de grande envergure avec des objectifs ambitieux et des problèmes techniques difficiles à résoudre.

Le choix d'un domaine peu complexe permettra de se décharger d'une partie des difficultés tout en permettant de se familiariser avec la technique. De même, le projet devra essayer de résoudre un problème pratique bien défini.

En l'occurrence, il s'agit plus précisément de quantifier les performances et les domaines de stabilité d'une MRV et d'examiner l'effet des spécifications de la machine et

des hypothèses empiriques ou simplificatrices sur eux. Les résultats obtenus ainsi que le raisonnement doivent être justifiés.

Dès lors, il faut privilégier le court terme, c'est à dire avoir un système utile et performant et bien apprécié par les utilisateurs spécialisés dans le domaine de la MRV. Cela permettra de développer les futurs projets dans un environnement porteur.

Effectivement, ces projets forment une suite et une extension naturelle du présent système expert qui ne constitue, en réalité, que le début d'un grand projet très ambitieux dans le domaine de l'ingénierie électrique. C'est pour cela qu'il doit y avoir un résultat concret pour couper court aux critiques passionnées qui se déclenchent quelquefois contre les projets système expert.

Il faut enfin essayer de limiter l'investissement matériel et logiciel en choisissant un outil de développement bon marché, cet outil devra suffire au projet pilote. À l'issue de ce projet pilote, l'équipe aura une expérience nécessaire et suffisante pour faire correctement les choix engageant des investissements plus conséquents pour la suite du projet.

3.6 - CHOIX DE L'OUTIL DE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME EXPERT SEMAREV

Une des conséquences du développement des recherches en Intelligence artificielle a été la naissance des techniques de programmation, basées sur des concepts issus de la programmation des systèmes de décision et privilégiant le "*Quoi*" (on spécifie ce que l'on cherche et on transmet les moyens de recherche de solution) par rapport au "*Comment*" (transmission de la solution).

Ce nouveau type de programmation dite déclarative par opposition à la programmation traditionnelle ou impérative (le programmeur indique à la machine, instruction par instruction, la suite des opérations à effectuer) permet de concevoir l'ordinateur non plus comme une machine à calculer toujours plus rapide et plus puissante mais plutôt comme une machine possédant un potentiel de calcul symbolique et pouvant traiter d'autres types de données autres que les données numériques.

Cette nouvelle vision de la programmation a entraîné la création de nouveaux langages de programmation. Les langages classiques, conçus pour les besoins du calcul numérique, sont dans la majorité des cas, inadaptés à l'écriture des programmes qui manipulent des "connaissances" et qui présentent des aptitudes de raisonnement.

Pour faire un choix, parmi les outils de développement disponibles sur le marché, il a fallu définir les caractéristiques et les performances du logiciel à élaborer. Le but étant d'avoir un ensemble cohérent, tout en réduisant le temps de développement du projet. Le langage choisi doit être :

- ❑ DÉCLARATIF : le langage de programmation doit être basé sur un formalisme permettant la définition fonctionnelle du logiciel, sans nécessiter la description détaillée des méthodes de mise en œuvre. Le programmeur, utilisant ce langage ne doit avoir à indiquer à l'ordinateur que ce qu'il "doit effectuer" et non "comment il doit l'effectuer". Le travail du programmeur doit être simplifiée, tandis que les détails de la mise en œuvre doivent être laissés à la charge du langage.
- ❑ RÉDUIT ET EXTENSIBLE : une particularité importante est de disposer d'un langage simple. Autrement dit, l'ensemble constitué par les mécanismes prédéfinis du langage doit être minimum. Cet ensemble d'instructions élémentaires devra pouvoir jouer le rôle d'un noyau à partir duquel pourront se bâtir divers extensions et environnements programmés.
- ❑ FONDÉ SUR UN MODÈLE MATHÉMATIQUE : pour que le développement d'un système expert puisse être réalisé de manière rationnelle, et pour faciliter le contrôle de cohérence, il est souhaitable que le langage de programmation choisi repose sur un modèle mathématique.
- ❑ UTILISABLE EN TANT QUE MÉTALANGAGE : le choix d'un langage possédant une organisation structurelle adéquate du domaine précis de l'application. L'intégration, a priori, d'un grand nombre de mécanismes spécifiques rendait le langage complexe (contraire au critère 2 : réduit et extensible). Aussi la possibilité d'utiliser le langage en tant que métalangage permet la définition syntaxique et sémantique de toutes sortes de mécanismes structurels et leur utilisation ultérieure en tant qu'outils d'environnement du langage.
- ❑ INTERFAÇABLE AVEC DES PROGRAMMES EXTERNES : le langage doit pouvoir permettre l'interfaçage avec des programmes ou langages externes, notamment il doit être capable d'échanger différents types d'informations.

Par conséquent, il est clair que les langages classiques, tels que FORTRAN ou PASCAL ne peuvent satisfaire l'ensemble des critères susmentionnés.

En effet, s'ils offrent certaines qualités de structuration et de modularité, ils ne permettent pas une approche déclarative des problèmes et plus particulièrement dans notre cas où on utilise des hypothèses et des simplifications de calculs.

Finalement, les principales catégories de langages d'implémentation pouvant répondre à ces critères sont principalement :

- les langages de programmation fonctionnelle construits à partir de LISP,
- les langages de programmation logique construits à partir de PROLOG.

Les premiers sont basés sur le calcul fonctionnel, alors que les seconds sont basés uniquement sur la logique symbolique (calcul des prédicats). C'est l'un ou l'autre de ces deux langages qui sera utilisé pour élaborer le prototype de système expert.

3.6.1 - Choix du Langage PROLOG

C'est en 1981, avec la publication du fameux rapport japonais sur “les ordinateurs de cinquième génération” dont l'objectif est de réaliser à l'aube de l'an 2000 des machines spécialisées dans le traitement de l'information et adaptées aux différents domaines de l'Intelligence artificielle, que PROLOG quitte “l'intimité” de quelques laboratoires de recherche universitaire pour aujourd'hui être largement répandu dans les universités, les laboratoires de recherche et les milieux industriels.

PROLOG (PROgrammation LOGique) est né en 1972 au sein du groupe d'intelligence artificielle de LUMINY (Université de Marseille) dirigé par A. COLMERAUER. Le but des travaux de cette équipe était alors d'intégrer à un langage de programmation certains développements de la logique mathématique et notamment le principe de résolution, méthode de démonstration automatique de théorèmes proposée par A. ROBINSON.

Ce principe permet de construire de manière systématique une démonstration à partir des déductions élémentaires reposant sur une règle de déduction.

Les différentes stratégies de résolution d'un problème en logique reposent essentiellement sur ce principe, elles sont :

- Saturation : Obtenir toutes les solutions possibles d'un problème,
- SL-Résolution : Vérification d'une solution pour un problème donné,

D'une façon générale, on retrouve dans la conception du langage PROLOG le concept de base de l'intelligence artificielle : séparation entre les connaissances et leurs modes d'utilisation.

La machine, qui exécute les programmes écrits en PROLOG (machine "virtuelle" en l'absence de véritable machine PROLOG), incorpore un formalisme de représentation de connaissances doublé d'un mécanisme général de résolution de problèmes.

PROLOG est en fait un langage de programmation conçu pour représenter et utiliser les connaissances que l'on possède sur un domaine précis. Plus exactement, le domaine est un ensemble d'objets et la connaissance est matérialisée par un ensemble de relations qui décrit à la fois les propriétés de ces objets et leurs interactions.

Programmer en PROLOG consiste à déclarer un certain nombre de données qui sont des éléments de la connaissance. La "machine PROLOG" résout un problème et donc elle répond à une question, grâce à un mécanisme d'inférence logique qui exploite les éléments de connaissances.

Les "faits" sont formalisés sous forme de règles exprimées en clauses de HORN : c'est la programmation modulaire et déclarative.

La machine PROLOG est capable de fournir à toute question une réponse si celle-ci est logiquement déductible des connaissances traduites sous forme de règles contenues dans le programme.

La résolution d'un problème est non déterministe : on obtient, sauf indication contraire, toutes les réponses satisfaisant la question posée. Plus précisément, PROLOG est un langage qui manipule des arbres de décisions, comme le montre la Fig. 3.7.

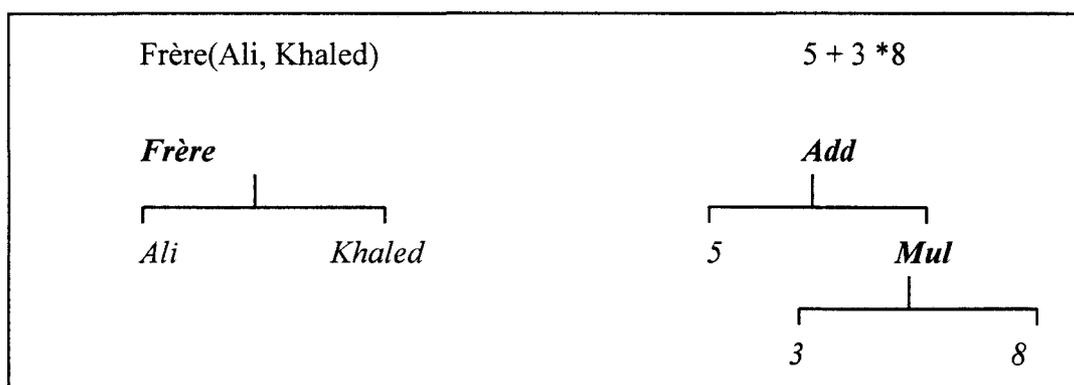


Fig. 3.7. Exemples d'Arbres de Décisions.

Les arbres peuvent contenir des parties variables, ce qui confère à PROLOG une énorme puissance car elles permettent de raisonner sur des objets totalement ou partiellement inconnus. Le programmeur peut parler des objets x et y sans les connaître et peut surtout exiger que ces variables satisfassent certaines contraintes.

Pour résoudre les contraintes sur les arbres, PROLOG utilise un algorithme de réduction appelé "unification".

Ces dernières années, on observe une tendance croissante à l'utilisation de PROLOG, en tant qu'outil de développement de systèmes experts dans différents domaines d'application. On peut affirmer avec certitude que depuis peu l'utilisation de la programmation logique a réussi à dépasser le contexte étroit de la communauté de l'intelligence artificielle dans laquelle elle s'était limitée pendant la période de son enfance (1968-1980) [MENEXIADIS 88].

Notre étude va donc s'appuyer, d'une part sur l'étude des travaux réalisés en PROLOG dans le domaine des systèmes experts, et d'autre part sur l'analyse des avantages offerts par rapport à son principal concurrent LISP et aux langages qui en sont issus comme KEE, ART, OPS (cf. Annexe 1).

3.6.2 - PROLOG : Outil de Développement de Systèmes Experts

Relativement à LISP, les travaux réalisés avec PROLOG sont moins nombreux. Ceci est dû principalement à la disponibilité récente du langage. Le premier compilateur PROLOG n'est apparu qu'en 1977, créé par D. WARREN à l'Université d'EDIMBOURG.

Actuellement, la tendance est favorable à utiliser de façon croissante cet outil pour l'implémentation de systèmes experts pour diverses applications.

3.6.2.1 - Avantages de PROLOG

Conformément aux critères précités, le langage PROLOG réunit à la fois une simplicité de mise en œuvre et de nombreuses et puissantes capacités, telles que :

- ❑ le style de programmation déclarative,
- ❑ le mécanisme d'unification.

La nature à base de règles de PROLOG nous montre que ce langage est un formalisme adéquat pour la représentation des connaissances sous la forme de règles de production. De plus, PROLOG a été reconnu comme une "écriture naturelle" pour la représentation symbolique des connaissances sous d'autres formes, notamment les réseaux sémantiques, les cadres (frames) et objets.

Le langage PROLOG jouit dès aujourd'hui d'une excellente portabilité. Des implantations de PROLOG sont déjà disponibles sur une grande variété de machines allant des micro-ordinateurs personnels à des systèmes et stations VAX ou 68000 (VMS et UNIX), DEC10 et DEC20.

En outre, les récentes implantations du langage PROLOG fournissent des grandes possibilités d'interfaçage avec d'autres langages évolués, en particulier LISP, FORTRAN, C et ADA.

3.6.2.2.- Problèmes Posés par PROLOG

Comme tout langage de programmation, PROLOG présente quelques inconvénients :

- *Parallélisme* : Des recherches ont été entreprises pour accélérer la procédure d'exécution des programmes PROLOG. Des recherches précises se développent pour l'exploitation du parallélisme qui est inhérent aux programmes logiques.
- *Stratégie de Contrôle* : La principale stratégie de contrôle de PROLOG (profondeur d'abord, de gauche à droite) s'est révélée insuffisante pour un certain nombre d'applications. Actuellement, des nouvelles stratégies sont à l'étude, incluant des procédures de contrôle plus souples.
- *Sémantique* : La sémantique des caractéristiques extra-logiques, qui ont été introduites dans diverses réalisations en programmation logique, doit être définie d'une manière plus rigoureuse. Il s'agit, en particulier, des prédicats internes de type "Assert" ou "Retract". Dans ce sens, des recherches tendent à exprimer, dans le cadre d'environnements de programmation, des logiques autres que le calcul des prédicats du premier ordre.
- *Bases de Données* : L'exploitation de la programmation logique, en tant qu'outil unique pour l'expression à la fois des données et des programmes, présente une importance particulière tant au niveau théorique que pratique. Plusieurs recherches se sont orientées dans ce sens vers la connexion de PROLOG avec de très grandes bases de données.
- *Ingénierie Logicielle* : Il est enfin nécessaire de compléter la programmation logique avec des outils de l'ingénierie logicielle (éditeurs de texte, debuggers) en vue d'aboutir à des environnements de programmation les plus complets possibles.

Bien que les insuffisances susmentionnées soient souvent relatives aux performances de rapidité du langage, des études récentes effectuées à l'Université

d'EDIMBOURG ont prouvé que les programmes LISP et PROLOG récents, effectuant des tâches identiques, présentent des temps d'exécution comparables.

Enfin, notre travail ne nous impose pas des évaluations et des analyses en temps réel, les temps de réponse du langage ne constituent pas un critère principal de choix.

3.6.2.3 - Atouts de PROLOG vis à vis des Autres Langages

Mis à part le fait de satisfaire l'ensemble des fonctionnalités souhaitables pour l'outil de développement, PROLOG présente d'autres atouts vis-à-vis de son rival ou concurrent le LISP :

- une partie du moteur d'inférence est fournie par le langage PROLOG lui-même, puisque le mécanisme d'exécution du langage est un mécanisme d'inférence logique,
- le mécanisme d'exécution de PROLOG est analogue au chaînage arrière utilisé dans les systèmes experts basés sur les règles de production,
- à un niveau conceptuel, PROLOG est très proche d'un noyau de générateur de systèmes experts (SHELL). Cette qualité est due à son aptitude à être utilisé comme un métalangage,
- en passant par la réalisation de méta-interpréteurs, un certain nombre de fonctions utilitaires courantes dans les systèmes experts peuvent être programmées telles que des modules d'interfaces homme-machine, des modules d'explication des raisonnements et des mécanismes de raisonnement "incertain".

Le dernier point concerne le rapport publié au JAPON à l'automne 1981, sur les "Ordinateurs de Cinquième Génération". L'objectif était de mettre au point pour les prochaines années des machines spécialisées dans le traitement des connaissances, en particulier dans les systèmes experts. Ce rapport et le programme de recherche portant le même nom font jouer un rôle de tout premier plan au langage PROLOG.

Ce rapport stipule en effet que c'est ce langage ou du moins un langage inspiré de PROLOG, que devront "comprendre" les futurs ordinateurs.

3.7 - DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME EXPERT

Dans le déroulement d'un projet de système expert, la phase de conception s'intercale entre la phase d'acquisition des connaissances et celle de formalisation et de codage. Cette phase de conception se décompose en deux étapes :

- une analyse de la connaissance suivie des spécifications du système expert,
- une analyse fonctionnelle suivie des spécifications de l'application.

L'analyse de la connaissance s'intéresse à tout ce qui relève du domaine de l'expertise, en particulier l'organisation de la connaissance et les stratégies de raisonnement. L'analyse fonctionnelle s'intéresse aux différents aspects de l'utilisation du logiciel. Cette deuxième phase ne diffère pas fondamentalement des analyses fonctionnelles faites pour des logiciels classiques.

Le modèle de connaissances relatives aux machines à réluctance variable, qui découle naturellement de l'étude faite au chapitre précédent, est composé de trois types de connaissances.

Le premier type réunit les différentes connaissances factuelles, qui ne sont autres que les spécifications de machine étudiée, généralement contenues dans une base de données.

Le deuxième type est composé, d'une part du modèle d'évaluation des diverses performances de la MRV (couple, courant, puissances) et d'autre part du modèle permettant l'étude de stabilité représenté par la méthode directe de LJAPUNOV.

Le dernier étant les heuristiques ou connaissances empiriques qui sont les différentes hypothèses simplificatrices qui peuvent être validées lors des sessions d'évaluation du système expert.

Le choix de PROLOG comme langage d'implémentation de ces connaissances sous forme de règles de productions simplifie considérablement la gestion et la mise à jour des éléments de la base de données, on utilisera la même forme de prédicats : les règles de production.

Dans ce qui suit, on va présenter la méthode de représentation sous forme de clauses des différents types de connaissances.

3.7.1 - Mise en Œuvre de la Base de Données des MRV

Les paramètres de la machine à réluctance variable, nécessaires pour l'évaluation de ses performances et la prédiction de ses régions de stabilité, sont tout d'abord saisis dans des champs avec un contrôle de validité de domaines, et puis stockés comme un élément indépendant dans une base de données spécialisée, comme illustré par la Fig. 3.8.

```
MRV(réf("mrv1"),paires_pôle(2),nb_phase(3),tension(220),fréq(50),pertes_fer(140),rs(4.5),xd(118),xq(28))
MRV(réf("mrv2"),paires_pôle(3),nb_phase(3),tension(220),fréq(50),pertes_fer(89),rs(0.35),xd(14.4),xq(7.2))
MRV(réf("mrvf60"),paires_pôle(4),nb_phase(3),tension(220),fréq(60),pertes_fer(90),rs(0.5),xd(35),xq(10.2))
MRV(réf("mrvf20"),paires_pôle(2),nb_phase(3),tension(85),fréq(20),pertes_fer(140),rs(2.5),xd(39),xq(9.2))
```

Fig. 3.8. Représentation des Éléments de la Base de Données.

Les spécifications de ces machines peuvent être modifiées et des nouvelles machines peuvent être facilement ajoutées à cette base de données. La Fig. 3.9 montre la simplicité de l'accès aux éléments de cette base de données en précisant uniquement la référence de la machine voulue. Les variables TENSION et RÉSISTANCE prendront les valeurs correspondantes de toutes les machines ayant comme référence "MRVf60".

MRV(réf("mrvf60"),,,TENSION,,RÉSISTANCE,,)

Fig. 3.9. Accès aux Éléments de la Base de Données.

3.7.2 - Représentation des Hypothèses Relatives aux MRV

Le choix des hypothèses s'effectue à l'aide d'un menu déroulant qui contient une description concise de toutes les hypothèses déjà implémentées dans le système expert.

Les hypothèses explicites validées sont, par la suite, stockées dans une bases de données dynamiques spécialisées et y resteront jusqu'à désactivation par l'utilisateur.

La Fig 3.10 ci-après donne des exemples d'hypothèses explicites utilisées actuellement dans le système expert SEMAREV.

H_{explicite} 1 : " $R_S \approx 0$, Résistance Statorique Négligeable"
 H_{explicite} 2 : " $W_0 \approx 0$, Pertes Fer Négligeables"
 H_{explicite} 3 : " $1 + R_S^2/X_d/X_q \approx 1$, Résistance Statorique Négligeable"

Fig. 3.10. Exemples d'Hypothèses Explicites.

3.7.3 - Représentation des Modèles de la MRV

Le modèle de la machine à réluctance variable utilisé par le système expert tient compte des hypothèses validées par l'utilisateur. La Fig. 3.11 illustre la méthode d'implémentation permettant l'évaluation du courant de décrochage de la machine, sous forme d'une règle de production.

Courant_Décochage(V,R_S,X_d,X_q,I_{po}):-Hypothèse(3), Not(Hypothèse(1)),!
 $I_{po} = (V/\sqrt{2}) * \sqrt{[1 - R_S/X_q + R_S/X_d] * [1/X_d/X_d + 1/X_q/X_q]}$
 Courant_Décochage(V,R_S,X_d,X_q,I_{po}):-Hypothèse(1),!
 $I_{po} = (V/\sqrt{2}) * \sqrt{1/X_d/X_d + 1/X_q/X_q}$
 Courant_Décochage(V,R_S,X_d,X_q,I_{po}):-!,Delta_{po}(R_S,X_d,X_q,D_{po}), Courant(V,R_S,X_d,X_q,I),I_{po}=I.

Fig. 3.11. Évaluation du courant de décrochage de la Machine.

3.8 - ARCHITECTURE ET FONCTIONNALITÉS DU SYSTÈME EXPERT

On a mis en place différentes composantes pour le système de représentation de connaissances, dont nous avons senti l'intérêt et la nécessité. Les modules, représentées par des formules PROLOG non élémentaires, sont directement exploités par le moteur d'inférence.

En plus de la base de connaissances et du mécanisme de raisonnement, nous avons mis en œuvre une interface utilisateur graphique à menus déroulants afin de faciliter la communication homme-machine. Elle comprend essentiellement :

- ❑ un module de saisie et de contrôle des domaines de validité des paramètres de machines à réluctance variable,
- ❑ un module de consultation de la base des données comprenant les spécifications des différentes machines à réluctance variable,
- ❑ un module de recherche assistée et de mise à jour de la base de connaissances des MRV,
- ❑ un module de gestion et de mise à jour des hypothèses validées dans la base de connaissances dynamique,
- ❑ un module d'explication et de justification des raisonnements suivis par le système expert permettant de créer un fichier de justification,
- ❑ un module spécialisé dans la représentation graphique des différentes performances de la machine à réluctance variable et de ses domaines de stabilité autour d'un point de fonctionnement,
- ❑ un module de calcul des performances des MRV, il permet, en outre, de créer un fichier résultats.

L'architecture des systèmes experts, illustré par la Fig.3.12, reflète la volonté de séparer les connaissances du domaine d'application et les mécanismes généraux de raisonnement. Elle reflète aussi le fonctionnement dynamique du système expert.

Le système expert est articulé autour de trois éléments fondamentaux :

- ❑ des connaissances rassemblées dans la base de connaissances sous un certain formalisme,
- ❑ un mécanisme de raisonnement appelé moteur d'inférence,
- ❑ des stratégies de fonctionnement.

Autour de ce noyau, s'ajoutent des éléments qui servent au fonctionnement journalier du système.

On trouve essentiellement l'interface utilisateur, c'est le lien entre l'utilisateur final et le cœur du système expert. Son rôle est de traduire les commandes que lui donne l'utilisateur, et d'afficher les informations (questions du système expert, résultats) de façon claire et intelligible.

Le système expert doit pouvoir utiliser des informations issues d'autres bases de données et communiquer des résultats à d'autres programmes.

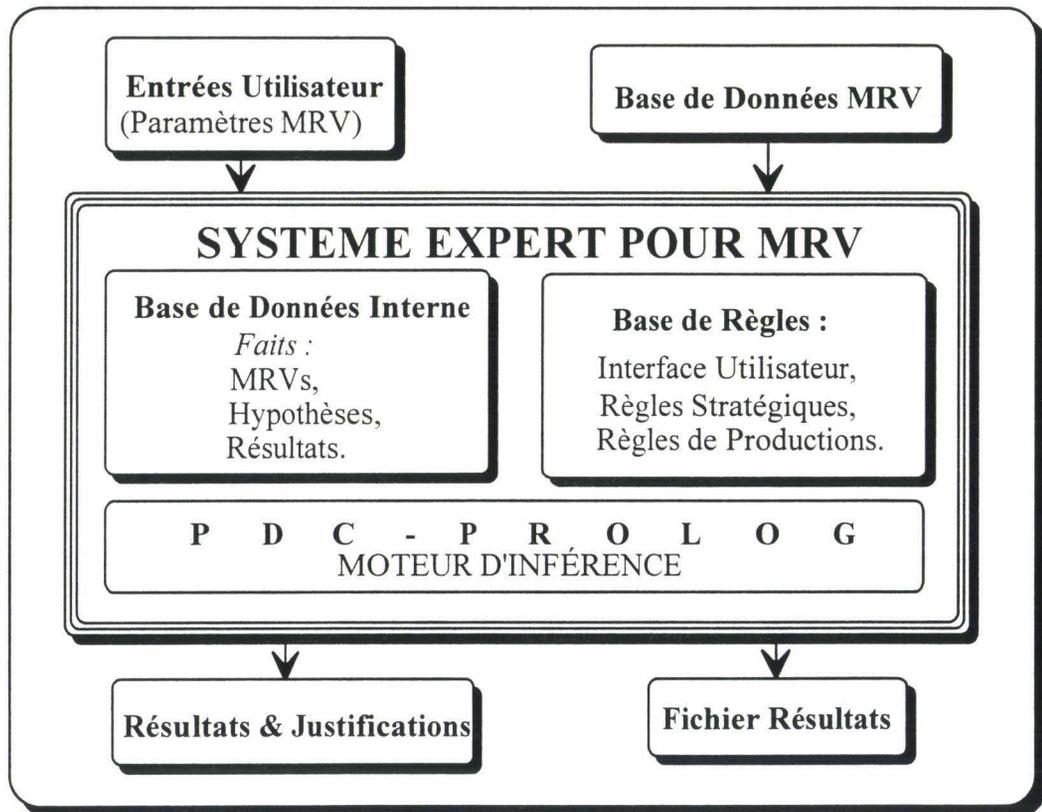


Fig. 3.12. Architecture du Système Expert Elaboré.

3.8.1 - Fonctions d'Explication

La capacité d'un système expert à expliquer son comportement est un élément très important de son ergonomie. Les explications qu'il fournit peuvent être utiles lors de l'exploitation pour expliquer le résultat et convaincre l'utilisateur, mais aussi lors de la mise au point du système, en conjonction avec le traceur dont la fonction est de suivre la trace du raisonnement effectué par le moteur d'inférence.

Les interlocuteurs du système, utilisateur et cogniticien, ne demandent d'ailleurs pas des explications pour les mêmes raisons. Il faut donc prévoir deux types de commentaires adaptés à chaque interlocuteur.

Il existe des techniques plus ou moins sophistiquées pour fournir des explications. Elles vont du simple affichage de la règle en cours d'évaluation à la construction d'un mécanisme spécialement dédié aux explications.

C'est cette dernière technique qui a été retenue pour notre cas. En effet, et en règle générale, la construction d'un mécanisme propre d'explication ne se justifie que lorsque la qualité des explications est un critère essentiel d'utilisation du système ce qui est le cas pour notre système expert.

3.8.2 - Fonctions de l'Interface

La rubrique interface rassemble deux grandes fonctions :

- la présentation des informations,
- les communications avec l'extérieur.

Il est important de distinguer deux éléments bien distincts en matière de présentation. Avoir une présentation et une utilisation fonctionnelle d'un outil pour le développement est une chose.

Le confort et l'ergonomie du système font beaucoup pour le développement. Mais, il est plus important de regarder quelles sont les possibilités offertes pour la construction d'interfaces utilisateur conviviales. Autrement dit, il est important de pouvoir transférer à l'utilisateur final le confort de l'utilisation de l'outil.

Un cogniticien doit soigner le dialogue système-utilisateur tant sur le fond que sur la forme. Pour cela, il doit disposer d'outils puissants de compositions graphiques, de créations de grilles d'écran et de menus de saisies.

Les capacités à communiquer avec l'extérieur sont le deuxième point important des fonctions d'interface. Un système expert doit pouvoir non seulement dialoguer et communiquer avec l'utilisateur, mais aussi interagir avec les autres composantes du système d'information dans lequel il est intégré : accès en cours de fonctionnement au système d'exploitation, à un langage de programmation ou à un système de base de données.

3.8.3 - Moteur d'Inférence

Le moteur d'inférence est la partie active du système expert. Il détermine quelles sont les connaissances à utiliser en fonction des requêtes de l'utilisateur. Puis, il enchaîne ces connaissances pour déduire des valeurs de performances et des régions de stabilité à partir des paramètres de la machine.

Le mécanisme mis en œuvre intègre à la fois les fonctionnalités désirées au niveau de l'utilisateur et l'aspect stratégique de résolution du problème. Du point de vue de l'utilisateur, le moteur peut être vu comme une fonction de calcul prenant comme argument les paramètres de la machine et les hypothèses qui, tous deux, sont présents dans la base de données.

Cette fonction permet de gérer différentes hypothèses de travail en parallèle procurant ainsi une vision globale des variations des performances et des régions de stabilité offertes à l'utilisateur. Enfin cette fonction est autodocumentée et peut expliquer à l'utilisateur le raisonnement qu'elle vient de finir en explicitant les différentes étapes.

3.8.4 - Interface Multi-Fenêtres

La réalisation d'une interface nécessite la définition du profil et de la fonction des différents utilisateurs. Dans notre cas deux types d'intervenants peuvent être rencontrés : l'utilisateur final qui étudie la MRV et le concepteur. Quel que soit le type d'utilisateur rencontré, le rôle principal de l'interface est de masquer l'aspect purement informatique de l'outil manipulé.

L'idée de base consiste en une approche fondée sur la décomposition de l'écran en régions superposables. Chaque région possède les mêmes fonctionnalités que l'écran initial (défilement, retour à la ligne, couleur d'écriture et de fond). Une région constitue ce qu'on appelle une fenêtre.

La structure d'une fenêtre de l'écran fait apparaître plusieurs zones : les menus utilisateurs, les fenêtres menus et les fenêtres de saisie. Plusieurs fenêtres peuvent être visibles simultanément à l'écran mais, une seule est active du point de vue entrées/sorties. La fenêtre active est toujours au premier plan.

Les menus sont de type déroulant et sont constitués d'items ou choix organisés en une arborescence. Chaque item de l'arborescence est soit lui-même un sous-menu (définition récursive), soit une action associée si l'item est terminal.

Une action est déclenchée automatiquement dès que l'item correspondant est choisi. Un menu ou item ne peut avoir que trois états : inactif, sélectionné et choisi. Lorsque l'item est inactif seul son nom est affiché. Dès qu'un item est sélectionné celui-ci change de couleur.

Enfin, si l'item est choisi, soit celui-ci est terminal auquel cas l'action associée est immédiatement exécutée, soit il constitue la racine d'un menu qui est déroulé. L'accès aux différents menus, sous-menus ou fenêtre peut se faire indifféremment par le clavier ou par la souris.

3.9 - CONCLUSION

En conclusion, après avoir passé en revue les divers formalismes de représentation de connaissance, notre choix s'est finalement porté sur celui du langage de programmation PROLOG. Sa nature à base de règles de production en fait un outil performant de représentation de connaissances.

Par ailleurs, à un niveau conceptuel, PROLOG est très proche d'un noyau de générateur de systèmes experts, à cause de son aptitude à être utilisé éventuellement comme métalangage c'est-à-dire il permet de créer des mécanismes syntaxiques et sémantiques pour rendre encore plus facile l'étape de la mise en œuvre du système expert.

Nous venons de montrer, dans ce chapitre, l'implémentation du mécanisme de raisonnement et la mise en œuvre, avec le langage PROLOG, des concepts définis au chapitre précédent concernant l'étude des machines à réluctance variable. En fait, on a décrit l'architecture de la base de connaissance, les connaissances expertes ainsi que leurs représentations sous forme de règles de productions.

Dans la dernière partie on a fait une description concise de l'architecture du système expert élaboré en présentant la structure et les interactions entre ses diverses composantes.

On propose, dans le chapitre suivant et afin de pouvoir valider le système expert SEMAREV, d'évaluer la totalité de ses performances par comparaison de ses résultats avec ceux obtenus durant les différents essais expérimentaux.

CHAPITRE 4 :

ÉVALUATION ET VALIDATION DU SYSTÈME EXPERT

4.1 - INTRODUCTION

L'objectif principal de cette étude est de démontrer la faisabilité, l'intérêt et l'utilité d'un outil de type système expert pour l'évaluation de performances et d'analyse de stabilité pour un type bien particulier de machines électriques en l'occurrence les machines à réluctance variable. Le but de l'évaluation n'est donc pas d'obtenir un niveau d'expertise plus important, mais plutôt de valider l'approche proposée en démontrant que les performances du système expert sont acceptables à partir de quelques cas tests tout en montrant sa capacité à traiter des cas réels afin de déterminer son degré de convivialité.

Par conséquent, la phase d'évaluation et de validation consistera à vérifier que le transfert des connaissances s'est bien réalisé des références bibliographiques et des experts vers le prototype. D'autre part elle servira à montrer que les résultats d'inférences, que se soit pour les performances ou les régions de stabilité, du système expert élaboré sont en conformité totale avec ceux issus des essais expérimentaux afin de s'assurer, à la fois, de la fiabilité et de la convivialité du prototype et de vérifier que les qualités globales de l'implantation sont satisfaisantes.

La mise en œuvre de la phase d'évaluation et de validation a néanmoins abouti à l'amélioration de certains aspects de l'interface utilisateur du système expert. Ce dernier aspect a posé le problème de la maintenance et de l'évolutivité du prototype.

Valider la totalité du système expert reviendra, à partir de ces essais et en utilisant des critères significatifs de crédibilité, à attacher un taux de réussite aux différents résultats obtenus aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif.

4.2 - ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ DU PROTOTYPE

Cette phase de l'évaluation du système expert, va consister essentiellement à s'assurer de l'absence de défauts apparents. La faisabilité du système expert a été évaluée formellement et d'une manière plutôt implicite, on verra plus loin que ces performances seront, par contre, mesurées quantitativement par comparaison de ses résultats avec ceux issues de l'expérimentation.

4.2.1 - Objectifs du Système Expert SEMAREV

La principale fonction de ce système expert est d'offrir une aide, en partant des paramètres d'une machine à réluctance variable et des hypothèses effectuées, pour l'évaluation des différentes performances et l'analyse des domaines de stabilité et de constater leurs variations vis à vis des différents paramètres susmentionnés. Le système expert doit justifier son raisonnement et donner les explications utiles à l'utilisateur afin qu'il puisse comprendre facilement les divers résultats obtenus.

Ainsi, ce système expert s'avère très utile dans diverses applications :

- Il permet aisément à un industriel de vérifier si les résultats de conception d'une MRV sont conformes à son cahier des charges du point de vue performances et stabilité. Il pourra être utilisé comme une première étape de la conception d'une machine puisqu'en partant des paramètres de la machine on évalue ses performances et par ajustement de ces paramètres on aboutit aux performances souhaitées de la machine à concevoir. Ces nouveaux paramètres pourront être utilisés comme des spécifications à un autre logiciel qui effectuera le dimensionnement de la machine.
- Il constitue un outil pédagogique pour l'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) de ce type particulier de machine électrique. Il permet de mettre en valeur les différentes contraintes rencontrées lors de la phase de conception d'une machine à réluctance variable et la difficulté de satisfaire plusieurs compromis imposés par le cahier des charges. Aussi on peut facilement constater l'influence des paramètres de la machine et de ses conditions d'utilisation sur ses performances et sa stabilité.
- Ce système expert peut être utilisé par un chercheur pour donner une certaine crédibilité aux résultats énoncés dans un article scientifique qui évalue les performances d'une machine à réluctance variable ou analyse ses régions de stabilité.

Il serait sans doute très intéressant d'aborder aussi les applications qui découlent des résultats ainsi obtenus de ce système expert, telles que le prototypage rapide de convertisseurs pour ces machines ou le choix d'une parmi plusieurs machines pour une application donnée selon des critères de performances et de stabilité, voire même la conception de la machine en partant de ces performances et ses régions de stabilité. Mais cela ferait l'objet d'une ou plusieurs extensions possibles du présent travail qui sont par ailleurs de grande utilité aux personnes du domaine de la MRV.

4.2.2 - Plan de Validation

À cette étape de l'étude, il s'agissait d'évaluer la fiabilité du système expert et de pouvoir conclure sur l'adéquation de la représentation des connaissances. Pour cela on a examiné la façon dont le système résout un échantillon de cas tests que se soit pour évaluer les performances ou pour prédéterminer les régions de stabilité d'une MRV.

De nombreuses méthodes générales d'évaluations de systèmes experts ont déjà été mises en œuvre, soumettant les cas tests simultanément au système expert et à des experts humains, de manière à mesurer les désaccords non seulement entre le système et les experts, mais aussi entre les experts eux-mêmes. Ces approches ont été menées le plus souvent dans le domaine médical, ou dans des domaines où il existe un certain consensus entre experts. Vu l'état d'avancement des techniques de modélisation des machines électriques d'une manière générale et des MRV particulièrement, on s'est limité à la résolution de cas tests choisis pour leur représentativité et dont la solution est connue a priori dans la littérature ou à posteriori après expérimentation.

4.3 - VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU SYSTÈME EXPERT SEMAREV

L'objectif principal de la campagne d'essais était d'évaluer la qualité des connaissances, et plus particulièrement les règles expertes, et des raisonnements mis en œuvre par le prototype et ainsi de prouver la faisabilité d'une telle approche. Les critères d'évaluation sont directement liés aux objectifs, fixés au départ, du système expert à élaborer. Ce sont des critères de compétence, de performance, de fiabilité et d'utilisation. Nous avons vérifié à ce niveau l'exactitude des raisonnements, aidés en cela par la nature structurée des connaissances et des performances décomposées du système expert lui même.

4.3.1 - Identification Expérimentale des Paramètres de la MRV à Stator Lisse

La détermination expérimentale des résistances et réactances, intervenant dans l'évaluation des performances et l'analyse de stabilité, vis-à-vis d'une quelconque perturbation par la méthode directe de LJAPUNOV, des machines à réluctance variable en régime établi, constitue un problème classique d'identification de processus.

Les paramètres à identifier sont les valeurs des inductances en direct et en quadrature L_d et L_q ainsi que la résistance statorique par phase R_s , si cette dernière n'est pas donnée par le constructeur.

Diverses méthodes d'identification de ces paramètres sont proposées dans la littérature [KAMINISONO 68], [WATSON 74], [LESENNE 81]. Notre but étant de connaître les valeurs de ces paramètres avec une précision assez raisonnable, pour pouvoir évaluer les performances de la machine et étudier en analysant sa stabilité en régime établi, on a opté pour une méthode statique de mesure de paramètres qui donne des résultats pertinents dans la zone linéaire de fonctionnement.

4.3.2.1 - Méthode d'Identification

La machine utilisée pour les différents essais est une machine synchrone à pôles saillants non excitée. Ainsi, cette machine aura le même comportement qu'une machine à réluctance variable à stator lisse. La mesure de la résistance d'une phase statorique est effectuée en courant continu à chaud en utilisant un circuit classique comprenant un voltmètre et un ampèremètre, on a mesuré $V=5.9$ Volts et $I=17.3$ Ampères, d'où l'on obtient :

$$R_s \cong 0.34 \Omega.$$

Une méthode simple et intéressante pour mesurer la réactance directe consiste à faire fonctionner la machine en moteur à vide. Dans ce cas le courant absorbé par le moteur a pour expression :

$$I_q = 0 \text{ et } I_d = I_0 = \frac{V}{\sqrt{X_d^2 + R_s^2}}, \text{ d'où : } X_d = \sqrt{\frac{V^2}{I_0^2} - R_s^2} \cong \frac{V}{I_0}$$

Par suite, l'impédance à vide est donc l'impédance directe et comme en ce point $dI/d\delta=0$, la mesure est précise même si les pertes à vides sont élevées [SARGOS 81].

À vide on a mesuré $V=127$ Volts et $I_0=8.8$ Ampères, d'où en négligeant R_s :

$$X_d \cong 14.43 \Omega.$$

Le modèle de la machine étant celui schématisé par la Fig. 2.7 et la machine sera montée de telle manière qu'on ait accès à l'enroulement d ou q seul, conformément au montage de la Fig. 4.1.

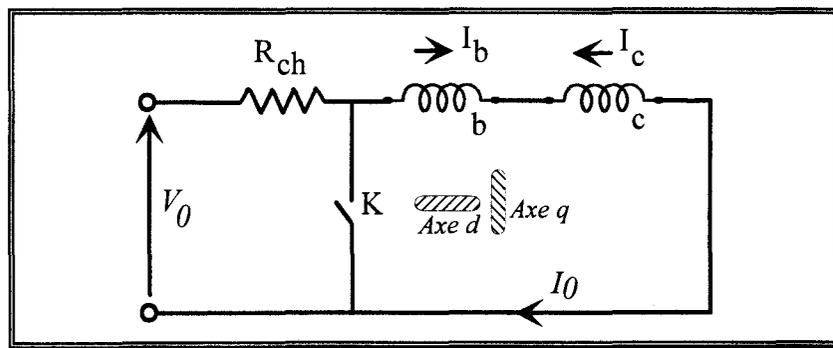


Fig. 4.1 Montage de la MRV Permettant l'Accès aux Courants I_d et I_q .

Les enroulements b et c sont montés en série, ainsi on est sûr que le même courant traverse les deux enroulements, celui de la phase a étant inutilisé. L'axe du rotor sera soit orthogonal soit aligné avec celui de la phase statorique a , pris comme référence.

L'interrupteur K étant ouvert, on applique une tension V_0 , d'où l'établissement d'un courant I_0 dans le circuit.

Ce courant I_0 est tel que :

$$\begin{cases} 0 = I_a \\ I_0 = I_b \\ I_0 = -I_c \end{cases} \quad (4.1)$$

Par ailleurs la transformation de CONCORDIA des courants statoriques s'écrit :

$$\begin{cases} I_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}(I_a - \frac{1}{2}I_b - \frac{1}{2}I_c) \\ I_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(I_b - I_c) \end{cases} \quad (4.2)$$

En outre, la relation entre la transformation de PARK et celle de CONCORDIA est donnée par le système d'équations :

$$\begin{cases} I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta \\ I_q = I_\beta \cos\theta - I_\alpha \sin\theta \end{cases} \quad (4.3)$$

On en déduit, pour les deux positions privilégiées du rotor, que :

- si l'axe du rotor est confondu avec celui de la phase a ($\theta=0$), alors :

$$\begin{cases} I_d = I_\alpha = 0 \\ I_q = I_\beta = \sqrt{2}I_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

- et si l'axe du rotor est perpendiculaire à celui de la phase a ($\theta=\pi/2$), alors :

$$\begin{cases} I_d = I_\beta = \sqrt{2}I_0 \\ I_q = -I_\alpha = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

On se retrouve donc dans les conditions d'une machine tournante à une vitesse constante et alimentée par un système de courants triphasés d'amplitude kI_0 .

Le schéma déduit du montage de la Fig. 4.1 est donné par la Fig. 4.2 ci-après.

À $t=0$, on ferme l'interrupteur K, le courant décroît et il est régi par les équations suivantes :

- À $t=0^-$, vu la continuité du courant imposée par les inductances, on a :

$$I_0 = \frac{V_0}{2R_s} \quad (4.7)$$

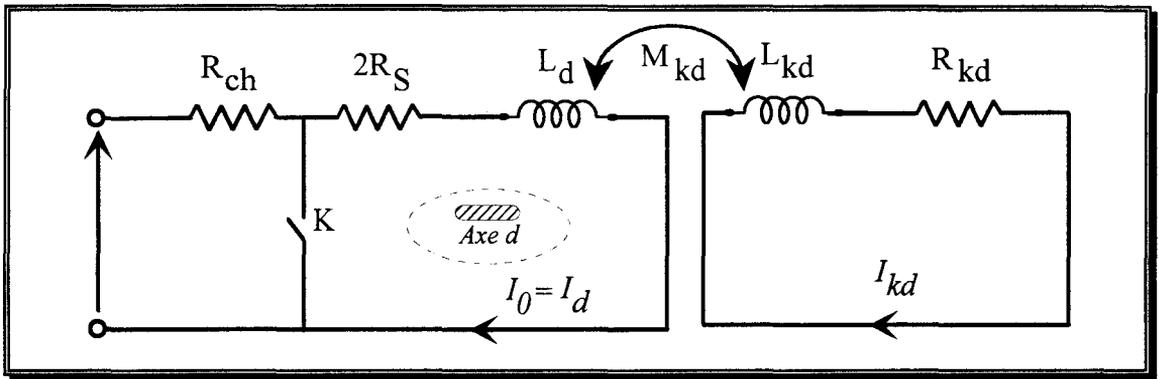


Fig. 4.2 Schéma Équivalent pour l'Axe Direct.

○ À $t=0^+$, on notant $R=2R_S$ et où i désigne l'axe direct d ou en quadrature q , on peut écrire pour les deux mailles :

$$\begin{cases} (R + pL_i)I - L_i I_0 + pM_{ki}I_{ki} = 0 \\ pM_{ki}I - M_{ki}I_0 + (R_{ki} + pL_{ki})I_{ki} = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

D'où l'on obtient l'expression de la transformée de LAPLACE du courant I :

$$I(p) = I_0 \frac{p + K}{\left(p + \frac{1}{\tau_1}\right)\left(p + \frac{1}{\tau_2}\right)} \quad (4.9)$$

avec :

$$\begin{aligned} K &= \frac{L_i R_{ki}}{L_i L_{ki} - M_{ki}^2} \\ \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} &= \frac{L_i R_{ki} + R L_{ki}}{L_i L_{kk} - M_{ki}^2} \\ \tau_1 \tau_2 &= \frac{L_i L_{kk} - M_{ki}^2}{R R_{ki}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

La transformée inverse de LAPLACE permet d'obtenir l'expression temporelle du courant dont la forme est :

$$I(t) = I_0 \left[k \text{Exp}\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + (1 - k) \text{Exp}\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right] \quad (4.11)$$

où :

$$k = \frac{\tau_2 (\tau_1 K - 1)}{\tau_1 - \tau_2} \quad (4.12)$$

Par ailleurs on a :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d(p) & -p\Omega L_q(p) \\ p\Omega L_d(p) & R_s + pL_q(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

où $L_d(p)$ et $L_q(p)$ désignent les inductances opérationnelles cycliques, suivant l'axe direct et l'axe en quadrature, exprimées comme suit :

$$L_i(p) = L_i - \frac{M_{ki}^2 p}{Z_{ki}} \quad (4.14)$$

avec :

$$Z_{ki} = R_{ki} + L_{ki} p. \quad (4.15)$$

Les inductances opérationnelles cycliques peuvent s'écrire encore sous une forme équivalente :

$$L_i(p) = L_i - \frac{1 + \tau_i'' p}{1 + \tau_{i0}'' p} \quad (4.16)$$

où :

$$\begin{aligned} \tau_i'' &= \frac{L_{ki}}{R_{ki}} \left(1 - \frac{M_{ki}^2}{L_i L_{ki}}\right) = \tau_{i0}'' \sigma_i \\ \tau_{i0}'' &= \frac{L_{ki}}{R_{ki}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

L'indice i désigne toujours l'axe d ou q , τ_i'' la constante de temps de l'amortisseur K_i , l'induit étant en court-circuit, τ_{i0}'' la constante de temps de l'amortisseur K_i , l'induit étant ouvert et σ_i le coefficient de dispersion entre le circuit de l'axe i et le circuit de l'amortisseur K_i .

Ainsi, des équations (4.10) et (4.17) on peut déduire :

$$\begin{aligned} L_i &= KR\tau_1\tau_2 = R(k\tau_1 + (1-k)\tau_2) \\ \tau_{i0}'' &= \tau_1 + \tau_2 - K\tau_1\tau_2 = k\tau_2 + (1-k)\tau_1 \\ \sigma_i &= \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1\tau_2} \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.3.2.2 - Exploitation des Résultats

La machine étant alimentée par une tension V_0 donnant lieu à un courant $I_0=15A$, à $t=0s$ on coupe l'alimentation et on enregistre l'évolution temporelle soit du courant I_d ($\theta=\pi/2$) ou celle de I_q ($\theta=0$) selon la position du rotor. Les courbes des deux courants I_d et I_q enregistrées sont données ci-après (Fig. 4.3 et Fig. 4.4).

En effectuant une simple identification, par la méthode des moindres carrés, des différentes constantes de l'équation (1.123), on trouve :

- suivant l'axe en direct :

$$k=0,66,$$

$$\tau_1=55 \text{ ms et } \tau_2=95 \text{ ms.}$$

D'où l'on obtient :

$$I_d(t) = 15 \left[0,66 \text{Exp}\left(-\frac{t}{0,055}\right) + 0,34 \text{Exp}\left(-\frac{t}{0,095}\right) \right]. \quad (4.19)$$

Par suite, on trouve :

$$L_d= 45,9 \text{ mH, soit } X_d=14,4 \Omega,$$

$$\tau''_{d0}=81 \text{ ms,}$$

$$\text{et } \sigma_d=0,3.$$

Par ailleurs, on remarque que cette valeur de X_d est conforme à celle trouvée par la méthode de mesure à vide de l'impédance directe.

- suivant l'axe en quadrature :

$$k=0,51,$$

$$\tau_1=19 \text{ ms et } \tau_2=49 \text{ ms.}$$

D'où :

$$I_q(t) = 15 \left[0,51 \text{Exp}\left(-\frac{t}{0,019}\right) + 0,49 \text{Exp}\left(-\frac{t}{0,049}\right) \right]. \quad (4.20)$$

Les différents calculs donnent :

$$L_q= 23,1 \text{ mH, soit } X_q=7,2 \Omega,$$

$$\tau''_{q0}=34 \text{ ms,}$$

$$\text{et } \sigma_q=0,2.$$

En résumé :

$R_s = 0.34 \Omega$ $X_d = 14.4 \Omega$ $X_q = 7.2 \Omega$
--

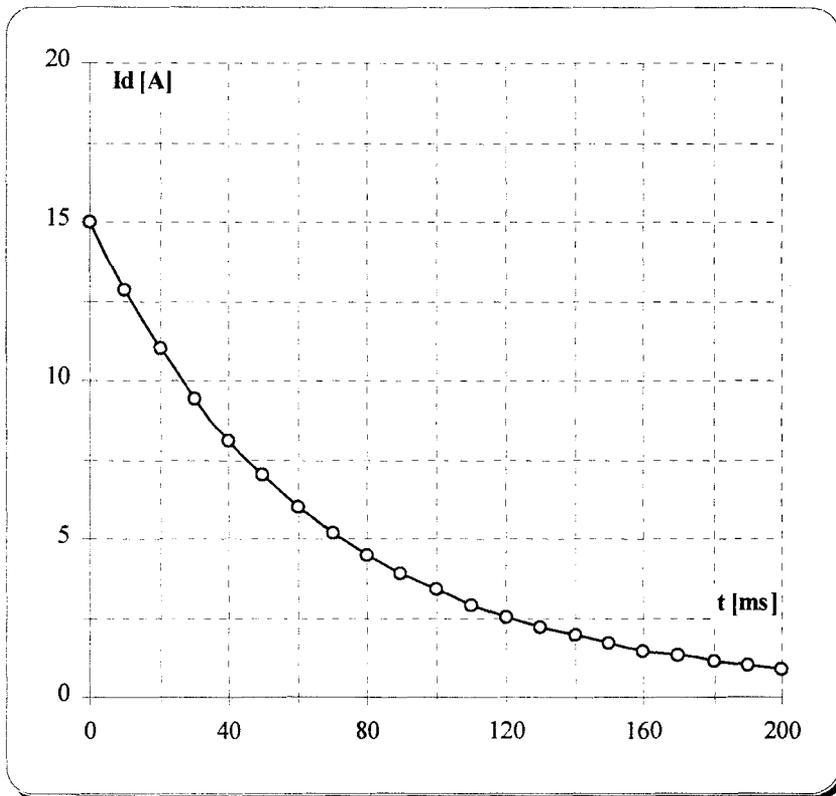


Fig. 4.3 Courbe de Variation du Courant I_d Enregistré.

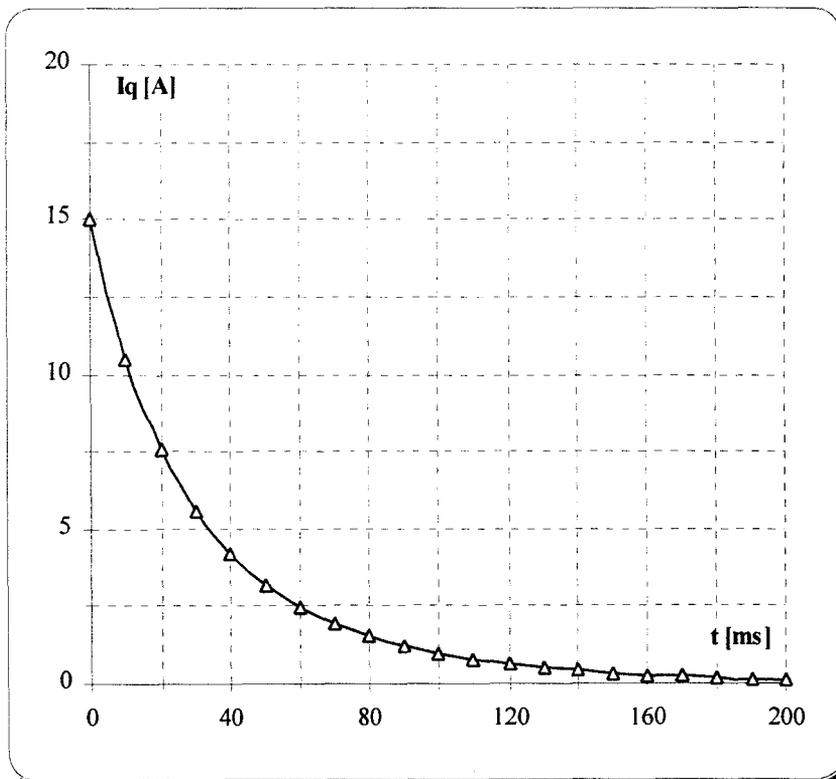


Fig. 4.4 Courbe de Variation du Courant I_q Enregistré.

4.3.3 - Mesure des Pertes Fer et Mécaniques

Un essai à vide de la machine a été effectué à une vitesse constante de 1000 tr/min tout en mesurant le courant I_0 , la tension V_0 et la puissance à vide P_0 (la machine étant mécaniquement découplée de toute charge).

La puissance à vide P_0 , mesurée dans ces conditions, représente les pertes à vide de la machine. D'ailleurs on peut séparer ces pertes en pertes JOULE à vide ($P_{j0} = 3R_S I_0^2$) et perte fer (P_{fer}) et mécaniques (P_m).

À tension donnée, les pertes fer et les pertes mécaniques sont supposées indépendantes de la charge, d'où l'on a :

$$P_{fer} + P_{méc} = P_0 - P_{j0}. \quad (4.21)$$

À vitesse constante, si la valeur efficace de la tension augmente, les pertes fer augmentent proportionnellement au carré de cette tension, quant aux pertes mécaniques, elles restent constantes.

La Fig. 4.5 représente la variation linéaire des pertes fer et mécaniques en fonction du carré de la valeur efficace de la tension, qui pour la tension nominale sont d'environ 168.9 Watts. En extrapolant cette courbe jusqu'à la valeur nulle de la tension on obtient les pertes mécaniques qui sont constantes, de l'ordre de 51,11 Watts puisque les pertes fer sont alors nulles.

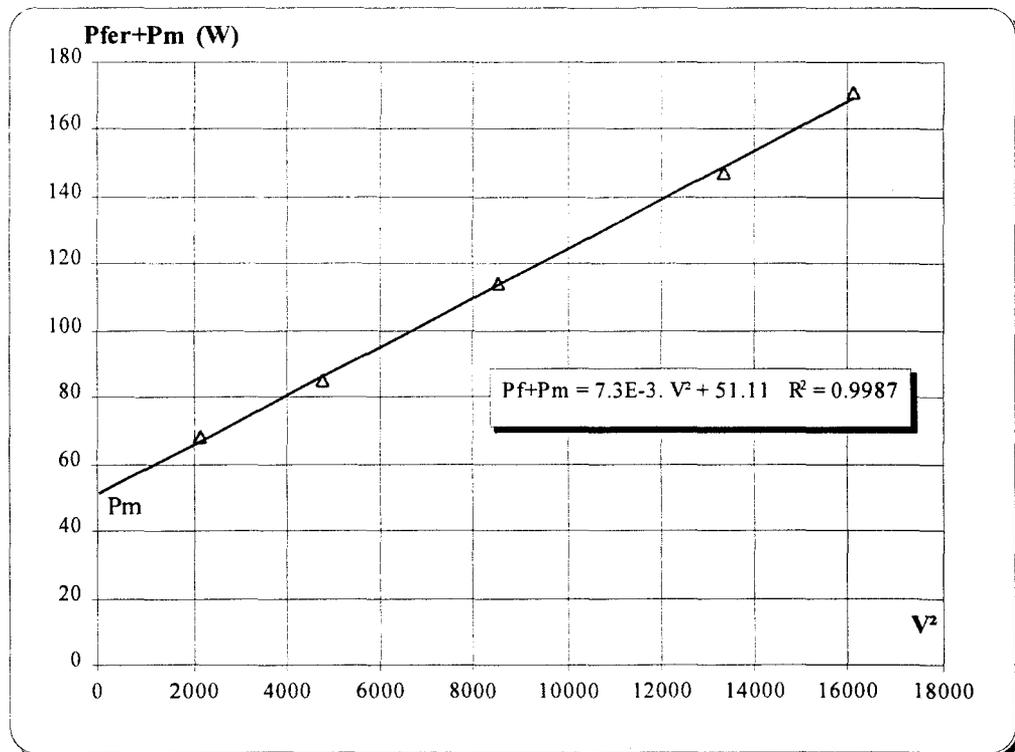


Fig. 4.5. Courbe de Variation des Pertes fer et Mécaniques de la Machine.

4.3.4 - Évaluation des Performances de la MRV et Influence des Paramètres

Après ces essais, on dispose maintenant des paramètres nécessaires et suffisants au système expert, outre les hypothèses qui peuvent être validées, pour l'évaluation des performances ou l'analyse de stabilité de la machine.

Ces paramètres sont les suivants :

- ❑ la résistance statorique ($R_s=0.34 \Omega$),
- ❑ la réactance synchrone directe ($X_d=14.4 \Omega$),
- ❑ la réactance synchrone en quadrature ($X_q=7.2 \Omega$),
- ❑ les pertes fer et mécaniques ($W_0=168.9 \text{ W}$),
- ❑ la vitesse de rotation constante ($N=1000 \text{ tr/min}$),
- ❑ la tension d'alimentation nominale constante ($V=127 \text{ V}$ et $f=50 \text{ Hz}$),
- ❑ le nombre de paires de pôles de la machine testée ($p=3$).

Dans ce qui suit on présentera puis on comparera les différentes performances évaluées par le système expert et celles mesurées expérimentalement où la charge de la machine est constituée par une machine à courant continu. Pour mesurer l'angle de charge interne on a utilisé un stroboscope ainsi qu'un rapporteur solidaire du rotor et la lecture se fait par différence avec l'angle de charge à vide.

4.3.4.1 - Puissance de Sortie et Facteur de Puissance

On a effectué des essais en charge de la machine à tension fixée pour deux valeurs de la résistance statorique, valeurs réelles et par adjonction d'une résistance, égale à la résistance statorique, en série avec chaque phase.

La mesure expérimentale de la puissance a été effectuée de deux manières : l'une consiste à mesurer la puissance d'entrée et de lui retrancher les pertes fer et mécaniques et les pertes JOULE, alors que l'autre, plus directe, où il s'agit de mesurer simplement à l'aide d'une dynamo-balance le couple disponible sur l'arbre et de déduire la puissance de sortie en sachant que la vitesse de rotation est constante de l'ordre de 1000 tr/min.

La Fig. 4.6 montre clairement l'influence de la valeur de la résistance statorique, surtout pour des valeurs relativement élevées de l'angle de charge, sur les caractéristiques de la puissance de sortie mesurées et calculées par le système expert. Les résultats expérimentaux confirment ceux du système expert.

On peut remarquer que l'angle interne de décrochage de la machine varie avec la résistance statorique et est pratiquement égal à $\pi/4$ quand la résistance statorique est égale à zéro ce qui est conforme à la théorie d'après l'équation (2.58b).

La Fig. 4.7 illustre bien l'influence du rapport des deux réactances synchrones de la machine sur les caractéristiques de la puissance de sortie mesurées et calculées qui, par ailleurs, sont en concordance.

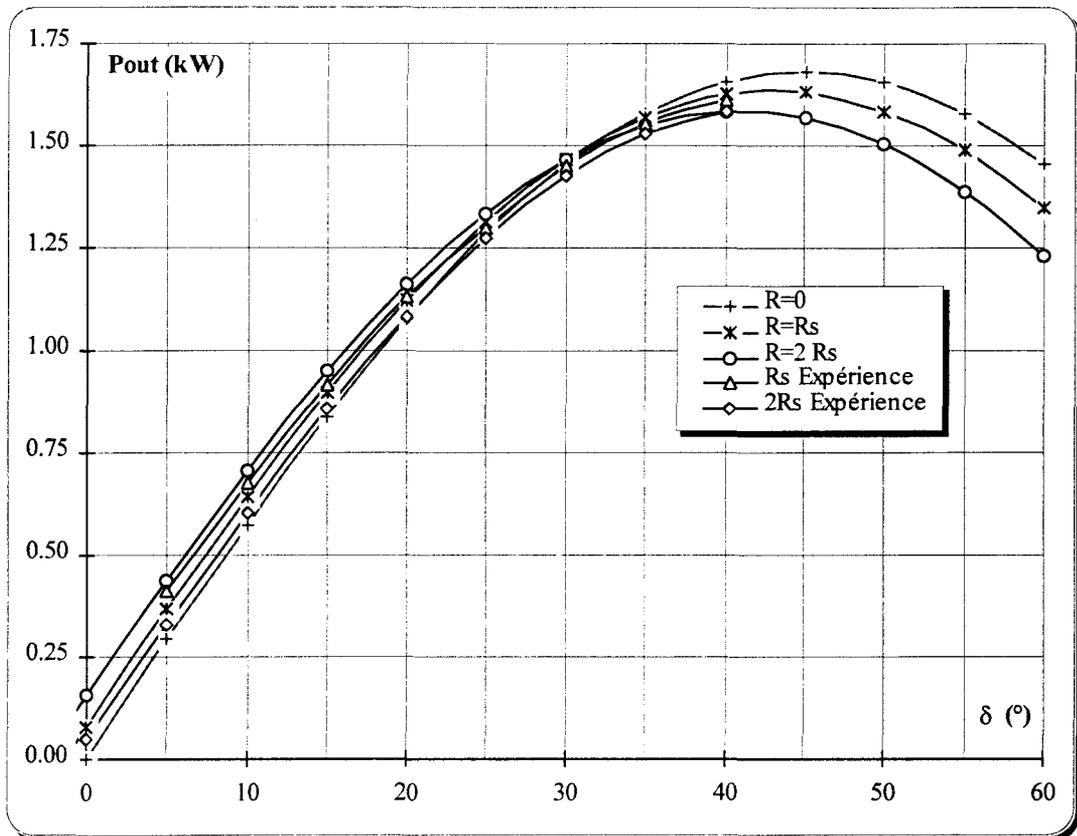


Fig. 4.6. Puissance de Sortie en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de la Résistance Statorique.

La Fig. 4.8 représente l'influence de la tension d'alimentation sur les caractéristiques de la puissance de sortie mesurées et calculées. D'après ces courbes on peut noter que l'angle de décrochage de la machine est invariant pour les différentes valeurs de la tension, en effet, ce dernier n'est fonction que des paramètres X_d , X_q , et R_s de la machine (2.58b).

La Fig. 4.9 représente l'effet du rapport $K_x (=X_d/X_q)$ sur les caractéristiques du facteur de puissance mesurées et calculées. On remarque bien la croissance du facteur de puissance avec l'augmentation de K_x puisque la saillance du rotor se trouve accentuée, quand K_x croît, ce qui a pour effet d'accroître le terme $(1/X_q - 1/X_d)$. Les faibles écarts entre les valeurs mesurées expérimentalement et calculées par le système expert peuvent être justifiés par les effets de la saturation et des harmoniques d'espace, qui ont été tous deux négligés, d'une part, et par les incertitudes de mesures des différents paramètres de la machine lors de l'identification expérimentale d'autre part.

L'effet de la résistance statorique sur les caractéristiques du facteur de puissance mesurées et calculées est mis en évidence sur la Fig. 4.10. Pour un point de fonctionnement donné, une augmentation du double de la résistance statorique améliore de 3 à 5% le facteur de puissance.

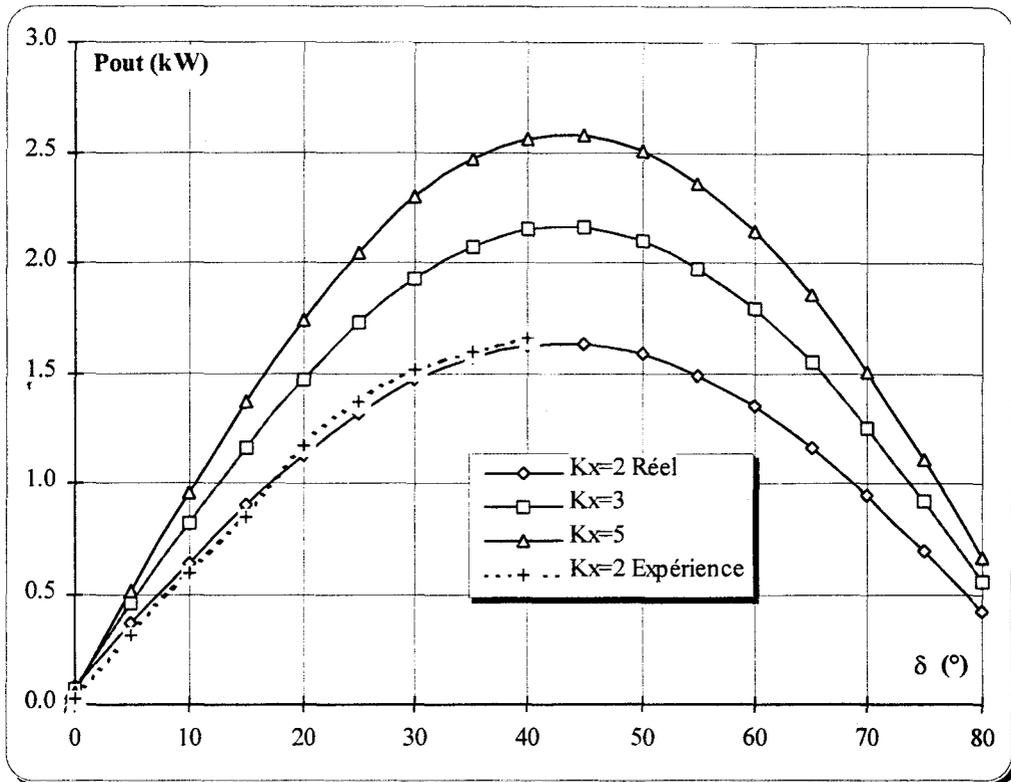


Fig. 4.7. Puissance de Sortie en fonction de l'Angle de Charge pour Différents $K_x = X_d/X_q$.

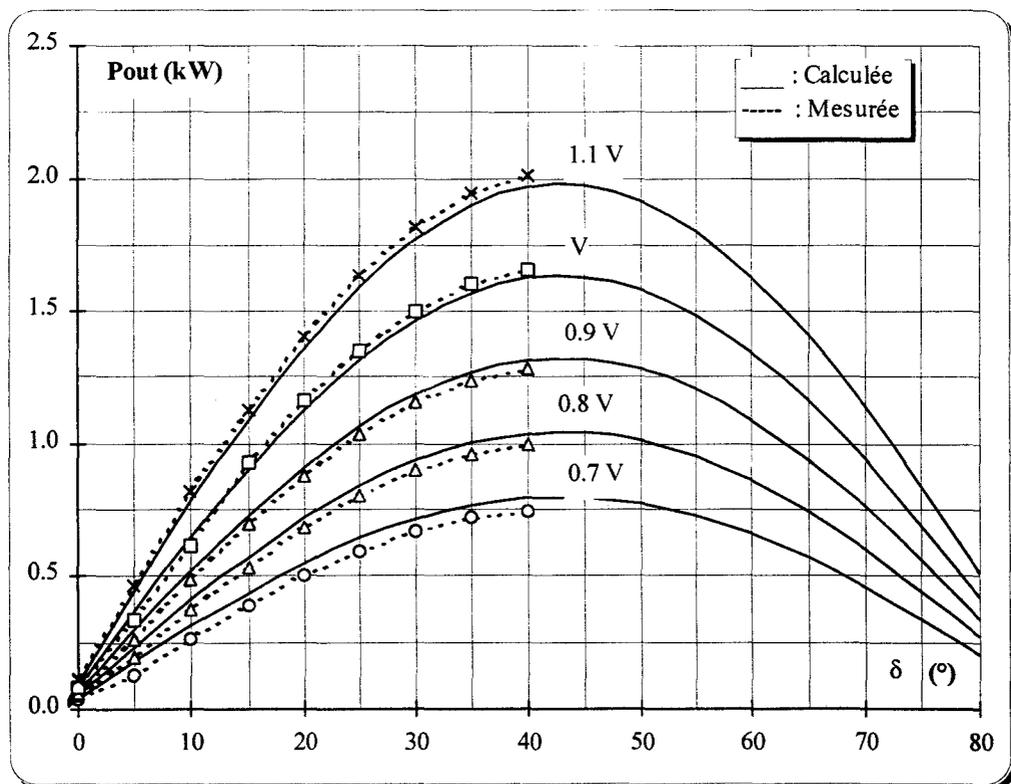


Fig. 4.8. Puissance de Sortie en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes valeurs de la Tension d'Alimentation.

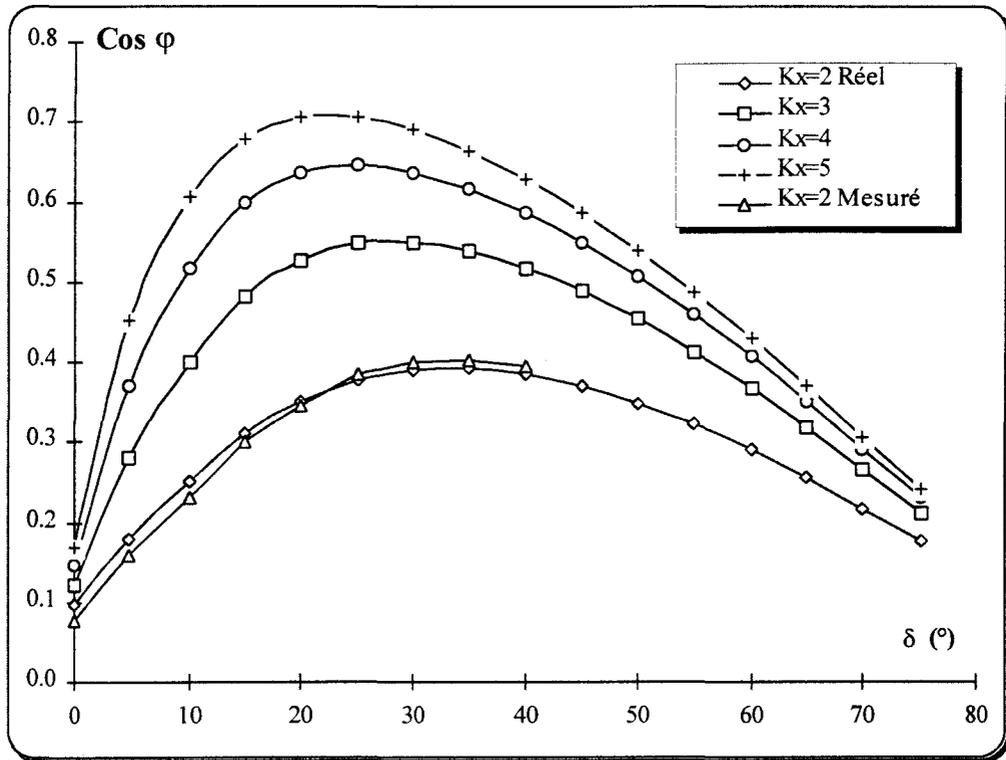


Fig. 4.9. Facteur de Puissance en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de $K_x = X_d/X_q$.

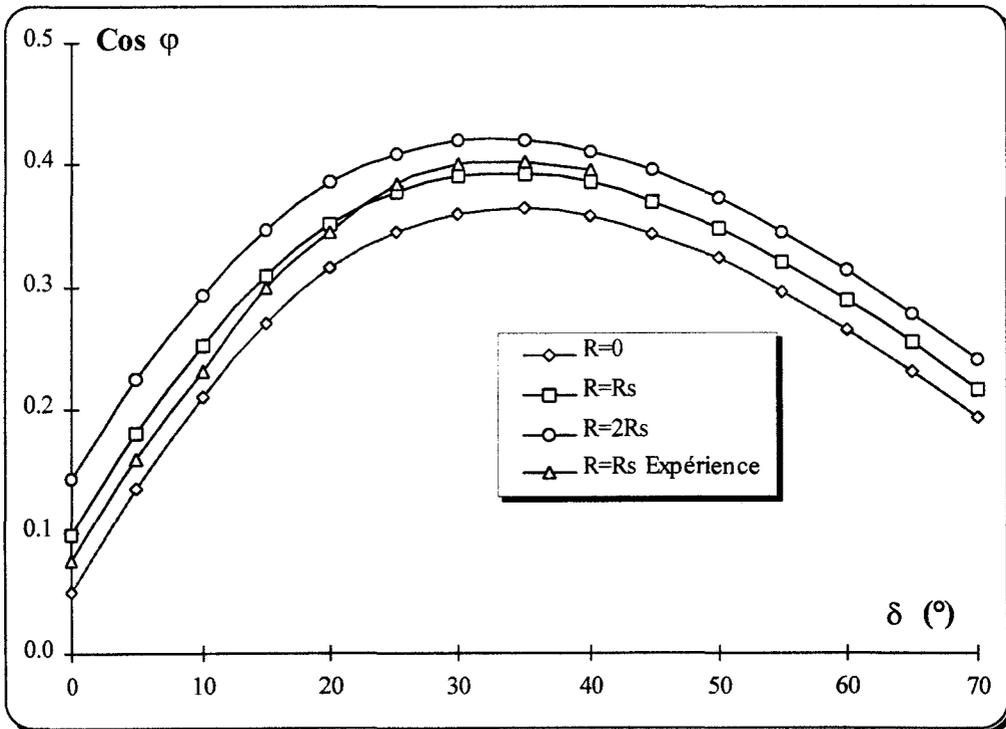


Fig. 4.10. Facteur de Puissance en fonction de l'Angle de charge pour Différentes Valeurs de la Résistance Statorique.

4.3.4.2 - Courant Statorique et Rendement

L'augmentation du rapport des réactances K_x se traduit par une diminution du courant statorique comme illustré par la Fig. 4.11.

Les variations de la résistance statorique, conformément à la Fig. 4.12, n'ont pratiquement pas d'effets sur le courant statorique vu les faibles valeurs de R_S . Par contre, l'augmentation de la résistance statorique cause des oscillations de la machine surtout pour des faibles charges, ce qui a été confirmé expérimentalement et on le prouvera dans l'étude de stabilité par la suite. D'où la conclusion qu'il sera plus avantageux, pour avoir une machine plus stable, de minimiser au maximum la résistance statorique.

Les caractéristiques du rendement de la machine en fonction de l'angle de charge pour différentes valeurs du rapport des réactances directes et en quadrature sont portées sur la Fig. 4.13. L'accroissement du rendement de la machine avec l'augmentation de K_x est dû principalement à l'accentuation accrue de la saillance du rotor pour des rapports K_x élevés.

La Fig. 4.15 permet de montrer que plus la résistance statorique est faible meilleur est le rendement de la machine puisque les pertes JOULE diminuent.

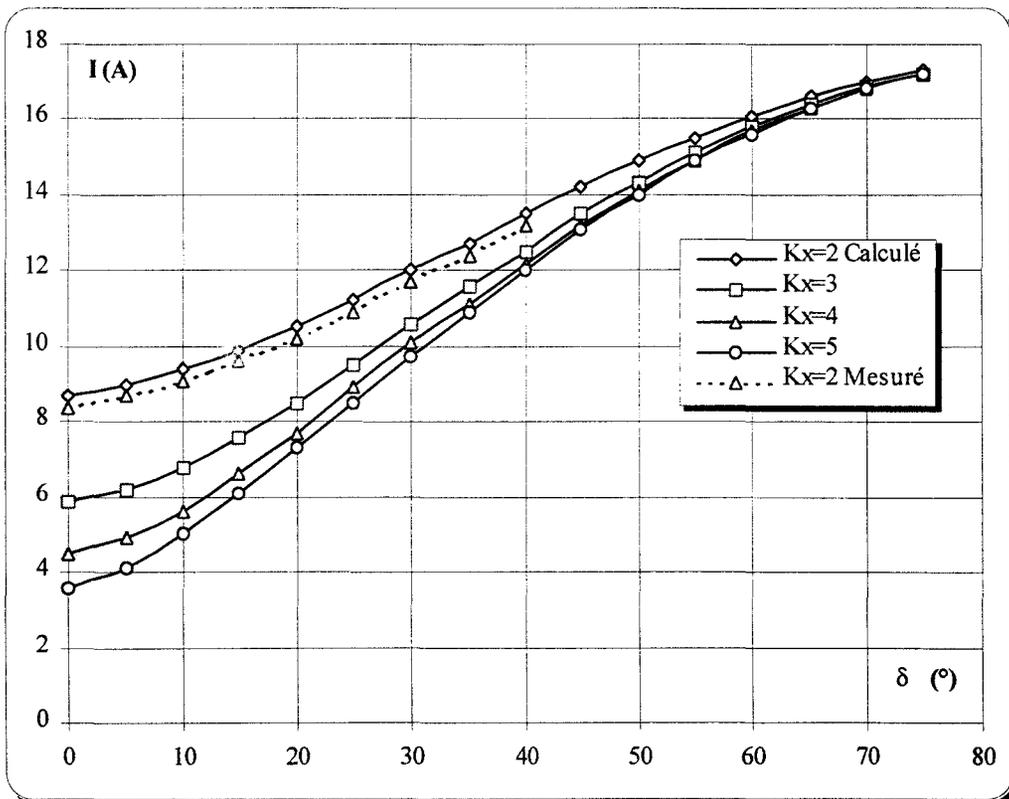


Fig. 4.11. Courant Statorique en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de $K_x = X_d/X_q$.

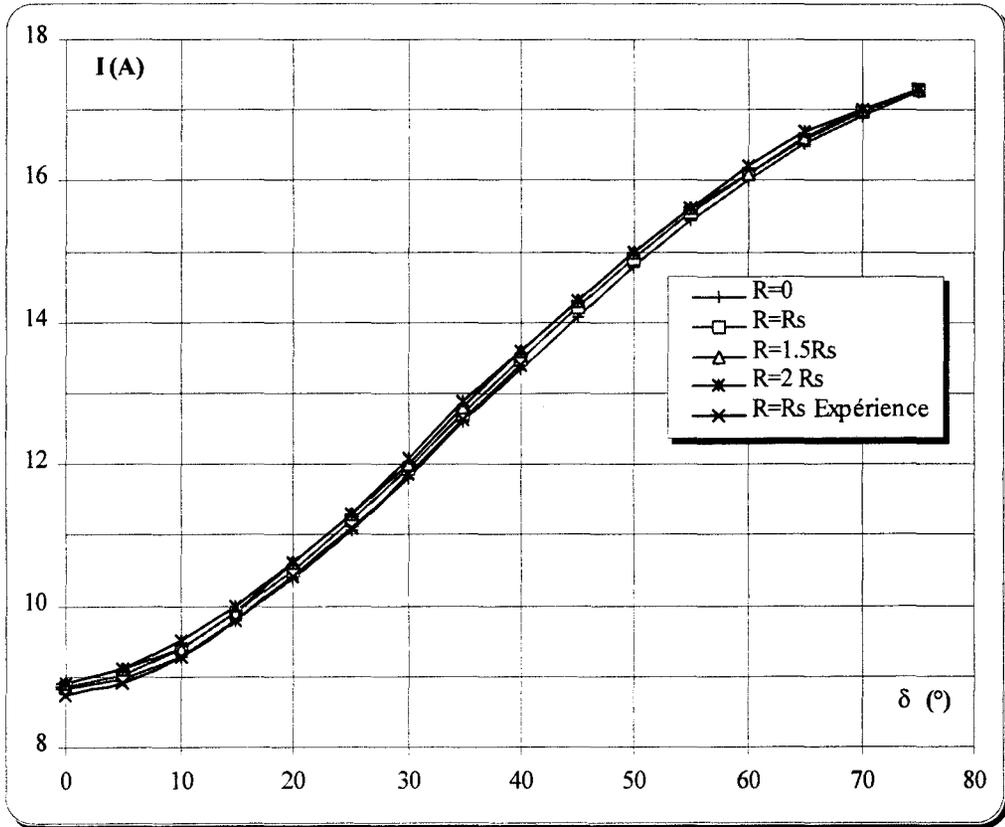


Fig. 4.12. Courant Statorique en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de la Résistance Statorique.

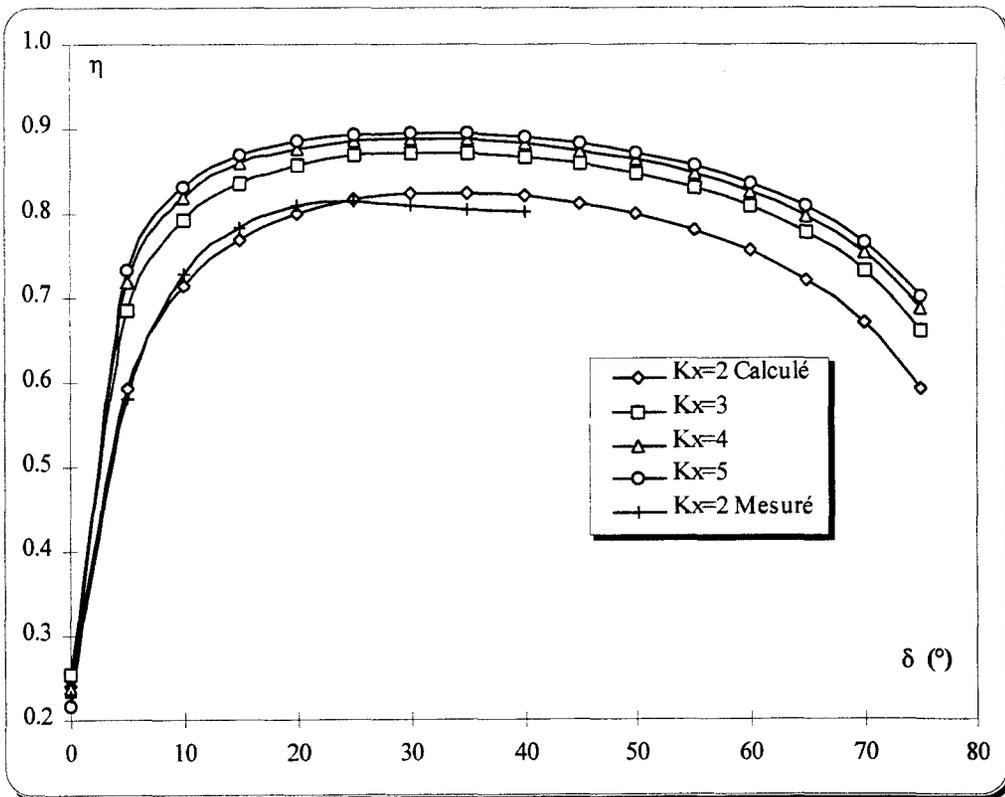


Fig. 4.13. Rendement de la Machine en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de $K_x = X_d/X_q$.

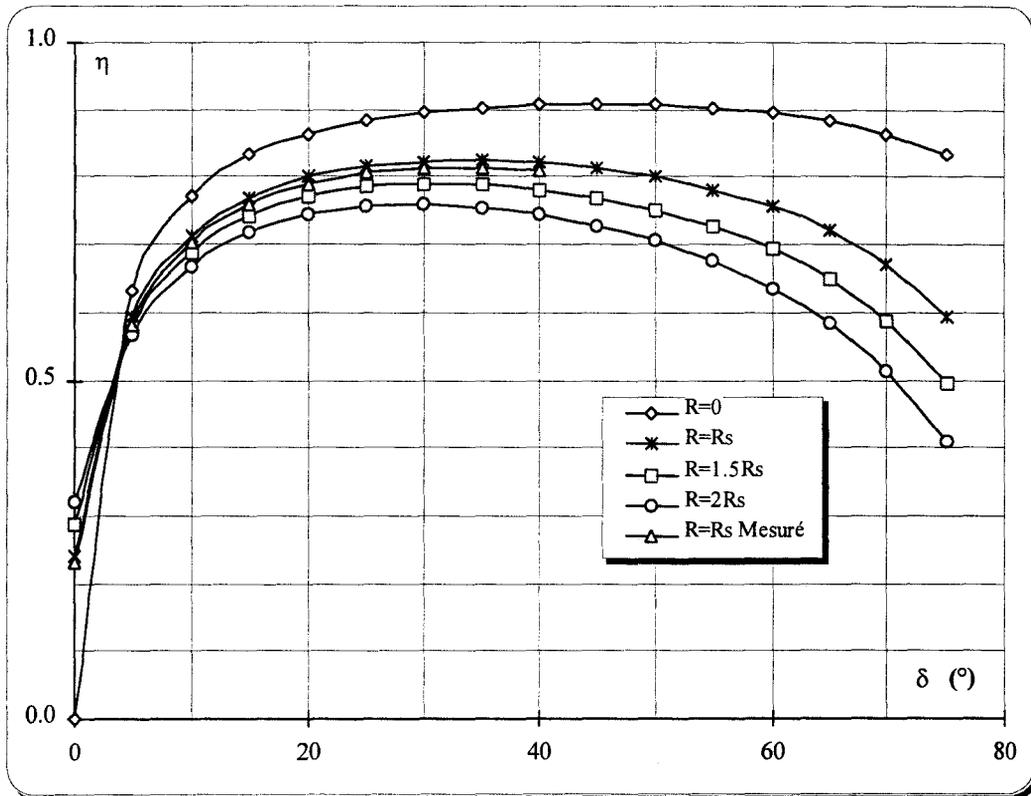


Fig. 4.14. Rendement de la Machine en fonction de l'Angle de Charge pour Différentes Valeurs de la Résistance Statorique.

4.3.4.3 - Diagramme du Cercle de la Machine

Pour différentes valeurs de la charge et à une tension fixée à la tension nominale de la machine, on a représenté le diagramme des puissances expérimental sur la Fig. 4.15. On constate que la courbe obtenue est quasiment confondue avec un arc de cercle.

L'affixe M de la puissance apparente complexe est un cercle centré au point C et de rayon R , à tension fixée, c'est aussi le lieu du point M représentant le courant. Ce diagramme de cercle théorique est schématisé par la Fig. 4.16.

Comme le segment OM est proportionnel au courant I , alors DM et OD sont respectivement proportionnels aux courants I_d et I_q . Quand I_d a sa valeur maximale et I_q est nul, c'est la limite du fonctionnement en moteur donnée par le point O' , à vide, on a alors :

$$\delta_{0'} = \frac{\pi}{2} - \text{Arc tan} \frac{X_d}{R_s} \cong 1.35^\circ. \quad (4.22)$$

La puissance active est nulle à l'intersection de (Γ) avec l'axe des puissances réactives, c'est la limite de fonctionnement en générateur [SARGOS 81].

Le point S_m est la limite de stabilité en régime moteur, alors que S_g , diamétralement opposé à S_m , est celui en générateur. Au point S_m , l'angle de charge, qui n'est autre que l'angle de décrochage de la machine, est donné par :

$$\delta_m = \delta_{po} = \frac{1}{2} \left[\text{Arc tan} \frac{X_d}{R_s} + \text{Arc tan} \frac{X_q}{R_s} \right] - \frac{\pi}{4} \cong 43^\circ. \quad (4.23)$$

La valeur de δ_m ci-dessus est en parfaite concordance avec celles des deux diagrammes des puissances théorique et expérimental.

Le fonctionnement à facteur de puissance maximal est obtenu au point M tel que OM soit tangent au cercle des puissances. D'après l'équation (2.87) donnant le facteur de puissance maximal, on a $\beta=49.10^{-3}$ et $K_x=2$ et par suite $\cos\varphi_{\max}=0.393$ qui est la valeur donnée par le système expert. Le facteur de puissance maximal du diagramme des puissances théoriques est 0.375 et celui du diagramme expérimental est de l'ordre de 0.37.

À tension fixée, l'induction moyenne dans la machine reste constante quand la charge varie [MEIBODY 86]. Autrement dit, le niveau de saturation reste inchangé (flux constant) et par suite les réactances directe et en quadrature sont constantes c'est pourquoi le diagramme des puissances reste un cercle, conformément aux résultats expérimentaux, au moins dans la zone stable de fonctionnement.

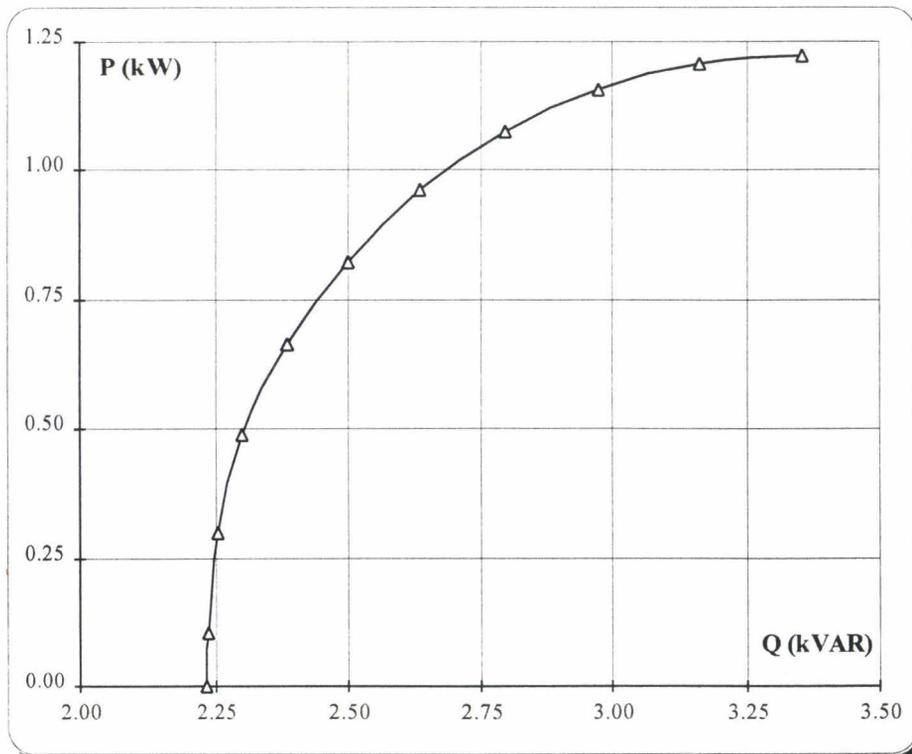


Fig. 4.15. Diagramme de Cercle Expérimental de la Machine.

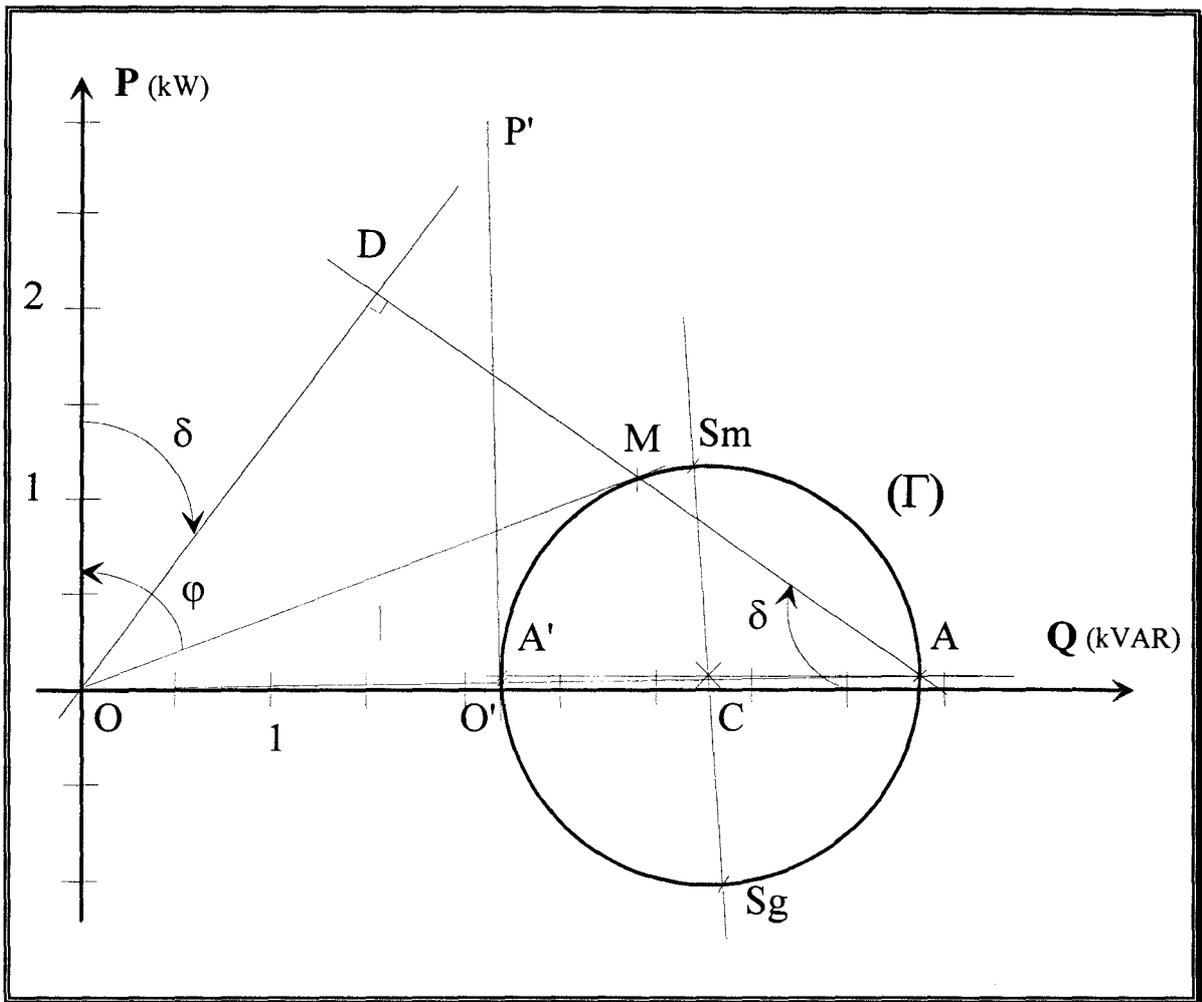


Fig. 4.16. Diagramme de Cercle Théorique de la Machine.

4.3.4.4 - Évaluation des Performances et Utilisation des Hypothèses

Les Fig. 4.16 et 4.17 sont des copies des écrans de justifications, donnés par le système expert, respectivement lors de l'évaluation du courant de décrochage et de la puissance de sortie.

L'utilisateur a choisi dans le menu des hypothèses les deux hypothèses suivantes, dont les effets sont explicites sur les performances à évaluer :

- $H_{\text{explicite n}^\circ 1}$: on suppose que " $1 + \frac{R_s^2}{X_d X_q} \approx 1$ " si $f \geq 30$ Hz est vrai.
- $H_{\text{explicite n}^\circ 2}$: on suppose que " $R_s \approx 0$ " est valable.

Ainsi, se révèle la puissance de l'approche système expert dans des applications de type enseignement assisté par ordinateur surtout par l'extrême facilité à fournir des justifications par simple consultation de l'historique d'activation des règles et des faits de la base de connaissances pour atteindre le but cherché.

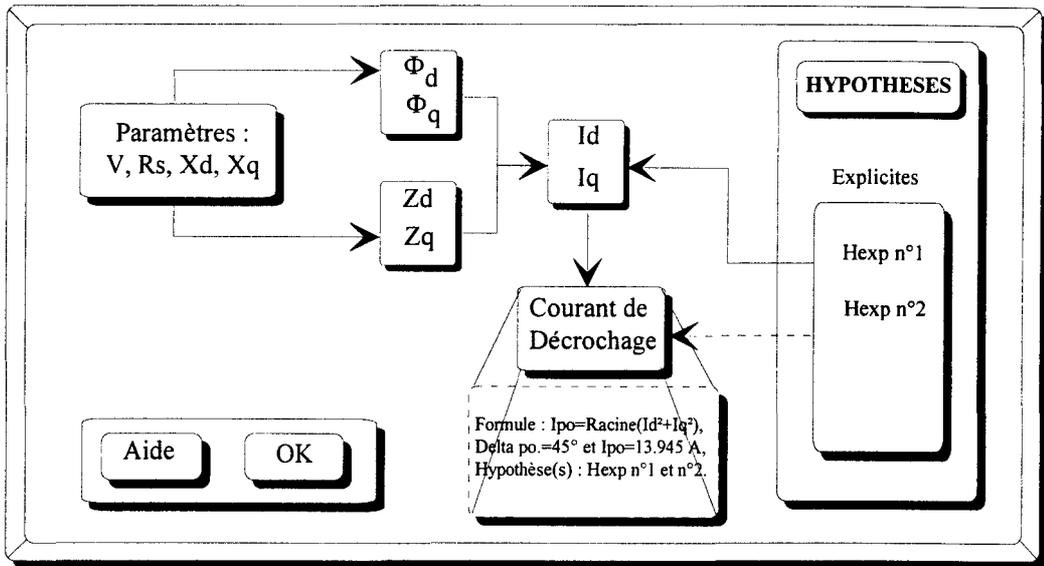


Fig. 4.17. Écran de Justification du Raisonnement permettant l'Évaluation du Courant de Décrochage.

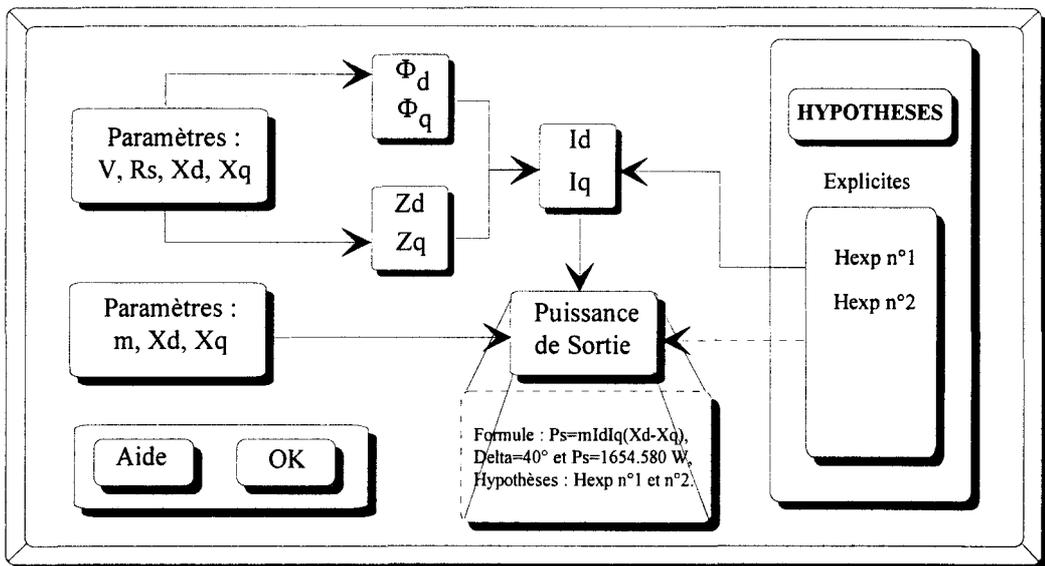


Fig. 4.18. Écran de Justification du Raisonnement permettant l'Évaluation de la Puissance de Sortie.

En conclusion, on peut dire qu'une fois la tension fixée, les caractéristiques des différentes performances de la machine à réluctance variable en fonction de l'angle de charge interne dépendent uniquement des trois paramètres R_S , X_d et X_q . On a privilégié R_S et X_d et on a exprimé les performances en fonction de R_S et $K_x = X_d/X_q$ parce que le rapport K_x , dépendant uniquement de la géométrie, permet des comparaisons aisées lorsque la forme des dents varie.

Pour la plupart des performances il est préférable d'avoir un rapport K_x le plus élevé possible. Pour ce faire, il est possible d'obtenir des valeurs très élevées des inductances moyennant des petits entrefer, mais la valeur de la réactance en quadrature est limitée en valeurs inférieures au mieux à la réactance de fuites dans les machines à stator lisse et à 0.3 ou 0.4 X_d dans les machines vernier (donc K_x variant de 3 à 4).

Il faut noter aussi qu'une diminution de X_q va le plus souvent en pair avec une diminution de X_d , donc équivalente à une augmentation de R_S (X_d/R_S diminuant n'est favorable qu'au facteur de puissance) ce qui prouve l'existence d'un compromis lors de l'optimisation géométrique de la machine pendant la phase de conception.

Les machines à réluctance variable fonctionnant en moteur présentent des performances et des comportements assez comparables à ceux des machines synchrones classiques, mais elles présentent un inconvénient qui est la faible valeur du facteur de puissance, qui ne s'améliore que si l'inductance en quadrature est petite soit un rapport $K_x = X_d/X_q$ élevé. Une machine à réluctance variable bien optimisée doit avoir une faible résistance statorique et un rapport de réactances K_x élevé.

Le meilleur point de fonctionnement, lorsque la machine est alimentée à tension constante, réalisant un bon compromis entre la puissance fournie et le rendement, se situe au voisinage du point où le facteur de puissance est maximal. Le régime à puissance maximal est pénalisé par un facteur de puissance plus faible. Au delà de ce point, le rendement, pour un angle de charge donné, décroît en fonction de la résistance statorique comme illustré par la Fig. 4.14.

Dans ce mode de fonctionnement le niveau de saturation dans la machine ne varie pas beaucoup en fonction de la charge et le diagramme des puissances actives et réactives reste un cercle au moins dans la zone de fonctionnement stable.

4.3.5 - Analyse de la Stabilité de la MRV et Influence de ses Paramètres

Les MRV sont largement utilisées dans diverses applications industrielles pour des raisons de simplicité de construction, de constance de vitesse et leur capacité à délivrer le couple maximum à toutes les vitesses. Plusieurs études ont été consacrées à la conception et au développement de ces machines afin d'améliorer leurs performances tant en régime transitoire qu'en régime établi. Mais, ces machines ont des régions de stabilité limitées ainsi que des faibles caractéristiques d'amortissements.

Dés lors, une attention particulière à ces problèmes d'instabilité s'impose, ce qui a été l'objet de plusieurs travaux de recherches. Ces travaux ont été basés sur l'application du critère de stabilité de NYQUIST, la méthode directe de LJAPUNOV ou les techniques d'espace d'état.

L'instabilité des machines à réluctance variable, suite à une perturbation, se traduit généralement par des oscillations amorties autour de la vitesse de synchronisme ou par une augmentation excessive des courants et par suite une perte du synchronisme.

Pour une tension d'alimentation et une fréquence constantes, cette instabilité est nettement affectée par les conditions de charge et par les paramètres de la machine, autrement dit, cette instabilité est due à une insuffisance d'amortissement de la machine elle même.

On a utilisé une nouvelle fonction de LJAPUNOV, donnant lieu à des domaines stabilité très proches de la réalité [MIYAGI 80], pour la détermination des domaines de stabilité dynamique globale d'une machine à réluctance variable en fonction de sa charge et de ses paramètres électriques.

4.3.5.1 - Analyse de la Stabilité par la Méthode Directe de LJAPUNOV

La méthode directe de LJAPUNOV avec la nouvelle fonction qui lui a été associée, qu'on a présentée dans le second chapitre au paragraphe 2.9.3.2 (2.122), a été appliquée à l'équation de mouvement de la machine à réluctance variable pour l'étude de la stabilité dynamique (oscillations de grande amplitude). Elle permet de prédire si les oscillations mécaniques du rotor suite à une perturbation apériodique seront amorties et la machine regagne son état d'équilibre stable ou non.

L'origine de ces perturbations peut être de petites variations de la charge, de la tension d'alimentation ou même des variation des paramètres électriques de la machine en question.

La Fig. 4.19 ci-après, montre clairement qu'à l'intérieur de la courbe fermée (F) la vitesse d'un point (x_2, x_1) est toujours dirigée vers l'intérieur et finira par arriver à l'origine et par conséquent le comportement de la machine en puissance est stable. Inversement, si la vitesse est dirigée vers l'extérieur, cas d'un point hors la courbe (F), la machine est instable hors ce domaine [GILLE 88].

Si la machine fonctionnant initialement avec un angle de charge δ_0 correspondant à une puissance P_0 subit une perturbation de la charge et se retrouve à δ_a , alors on peut anticiper sa stabilité et savoir à l'avance qu'elle ne perdra pas le synchronisme et regagnera l'angle de charge initial δ_0 .

Si l'angle de charge arrive à δ_b , suite à une perturbation de la charge, la machine sera instable et finira par décrocher. L'angle de charge critique est δ_c , pour lequel on ne peut affirmer ni la stabilité ni l'instabilité de la machine.

On peut ainsi anticiper et prédéterminer la stabilité de la machine et savoir à l'avance quelles sont les deux limites de perturbations qu'elle tolère sans décrochage, donc en étant toujours à l'intérieur de la surface fermée (F).

Ainsi, l'étude des problèmes de stabilité de la machine à réluctance variable revient à déterminer le comportement en vitesse du point de coordonnées (x_2, x_1) en différents points des surfaces fermées $V(x_2, x_1)=C$.

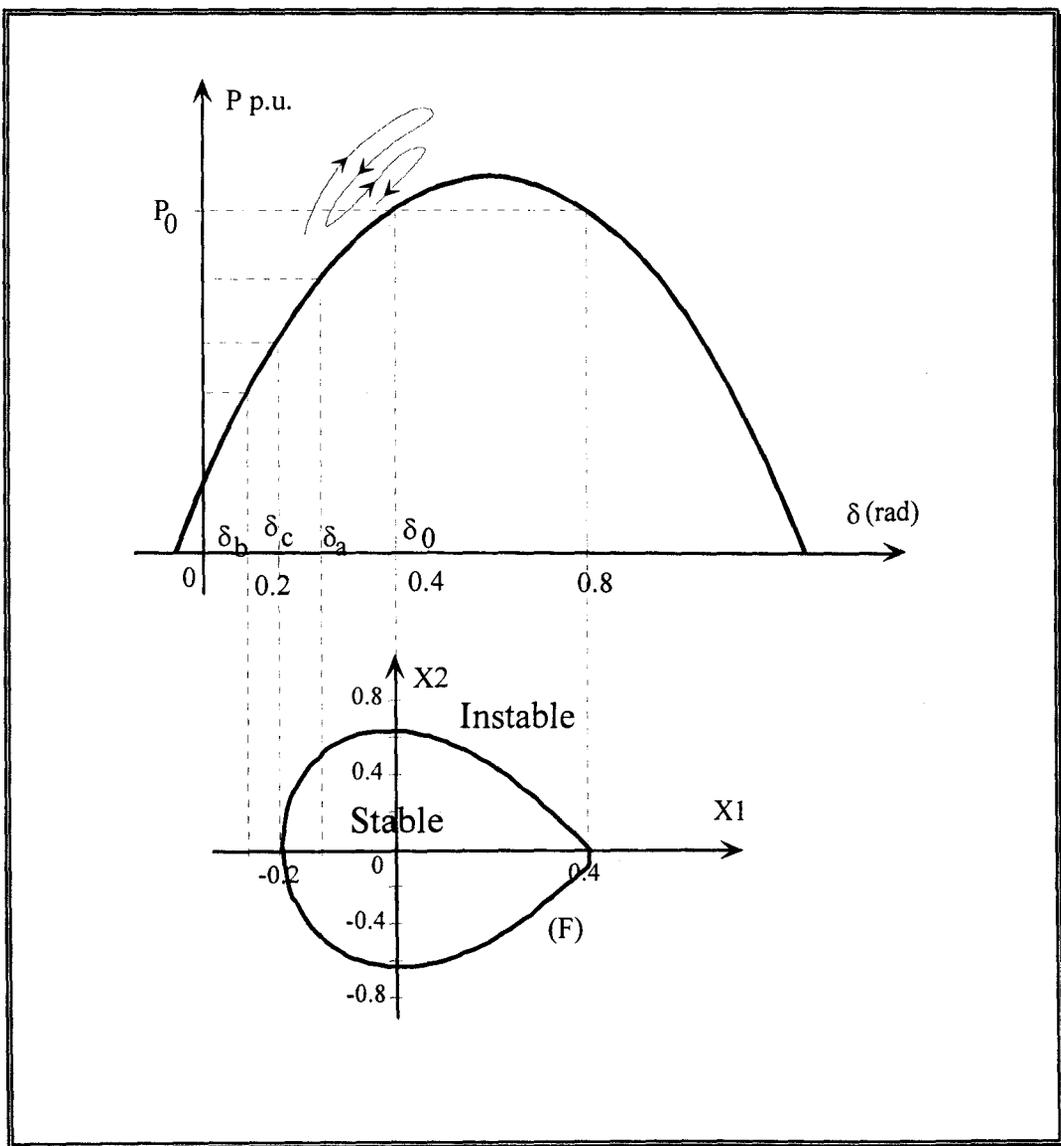


Fig. 4.19. Puissance de Sortie et Régions de Stabilité et d'Instabilité.

Pour cela, il faut étudier le signe de la dérivée dV/dt de V par rapport au temps, où V est une fonction de LJAPUNOV et C est une constante positive. Si dV/dt est négatif, V décroît, alors la vitesse est dirigée vers les surfaces à C plus petit donc vers l'intérieur. Si dV/dt est positif, la vitesse est dirigée vers l'extérieur.

Par ailleurs, il faut noter que cette méthode donne des *conditions de stabilité suffisantes* mais *non nécessaires*, et qu'une machine à réluctance variable peut admettre une infinité de fonctions de LJAPUNOV.

Par conséquent, le fait qu'une fonction V ne puisse prouver la stabilité de la machine, ne permet pas de conclure quoi que ce soit sur cette machine : peut être une autre fonction permet d'affirmer la stabilité ou l'instabilité.

Enfin, l'avantage majeur de l'utilisation de la méthode directe de LJAPUNOV réside dans le fait qu'on n'a pas besoin de résoudre les équations différentielles non linéaires régissant la machine pour prédire les conditions requises de stabilité [HOFT 68], [UEZATO 86].

4.3.5.2 - Effet des Paramètres sur la Stabilité Transitoire de la MRV

On s'intéressera dans ce paragraphe à déterminer l'influence des réactances directe et en quadrature, de la résistance statorique, du coefficient d'amortissement P_d et du coefficient d'inertie P_j sur les domaines de stabilité de la machine et sur la tension d'alimentation limite ainsi que la charge limite tolérables par celle-ci sans perte de synchronisme.

Tous les paramètres de la machine sont exprimés dans le système de valeurs réduites.

On rappelle l'équation de mouvement de la machine donnée par (2.109) :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} + \frac{1}{P_j} (P_0 - P_\ell) = 0 \quad (4.24)$$

Ainsi que la fonction de LJAPUNOV qui lui a été associée (2.122) :

$$V = \frac{1}{2}(x_2 + \alpha K_d x_1)^2 + \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1 - \alpha) x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du + 2K_d \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \int_0^{x_1} \sqrt{u g(u)} du \quad (4.25)$$

La résolution numérique de cette équation, dont les détails sont exposés dans l'Annexe 2, donne les courbes de stabilité correspondant à la trajectoire de la vitesse de l'angle de charge de la machine.

Le choix de la valeur de α ($0 \leq \alpha \leq 1$) tel que $\alpha=0.5$ est fait de telle manière que la fonction V donne lieu à la région de stabilité la plus large se rapprochant ainsi le plus du domaine de stabilité réel.

La Fig. 4.20 montre que pour $\alpha=0.5$ on obtient effectivement le domaine de stabilité le plus large. Pour les valeurs particulières de α , 0 et 1, où V prend la forme d'une fonction classique de LJAPUNOV, on obtient des domaines moins larges.

L'étude expérimentale de la stabilité de la machine précédemment testée n'a pu être effectuée pour des raisons purement matérielles.

Par conséquent, les résultats d'analyse de stabilité du système expert seront validés en les comparant à la fois à ceux issus de la résolution numérique de l'équation différentielle non linéaire (4.24) et en utilisant les paramètres de la machine étudiée dans [UEZATO 86].

Ces résultats, qui seront analysés ultérieurement, concernent une machine à réluctance variable dont les paramètres dans le système de valeurs réduites sont les suivants :

- résistance statorique $R_S=0.1206$ p.u.,
- réactance directe $X_d=1.397$ p.u.,
- réactance en quadrature $X_q=0.463$ p.u.,
- coefficient d'amortissement $P_d=0.1000$ p.u.,
- coefficient d'inertie $P_j=0.640$ p.u. donc $K_d=0.1563$ p.u.,
- tension d'alimentation $E=1.0$ p.u.

Le point de fonctionnement stable en régime permanent a été défini par un angle de charge $\delta_0=0.4$ rad et une puissance de sortie $P_0=1.6$ p.u.

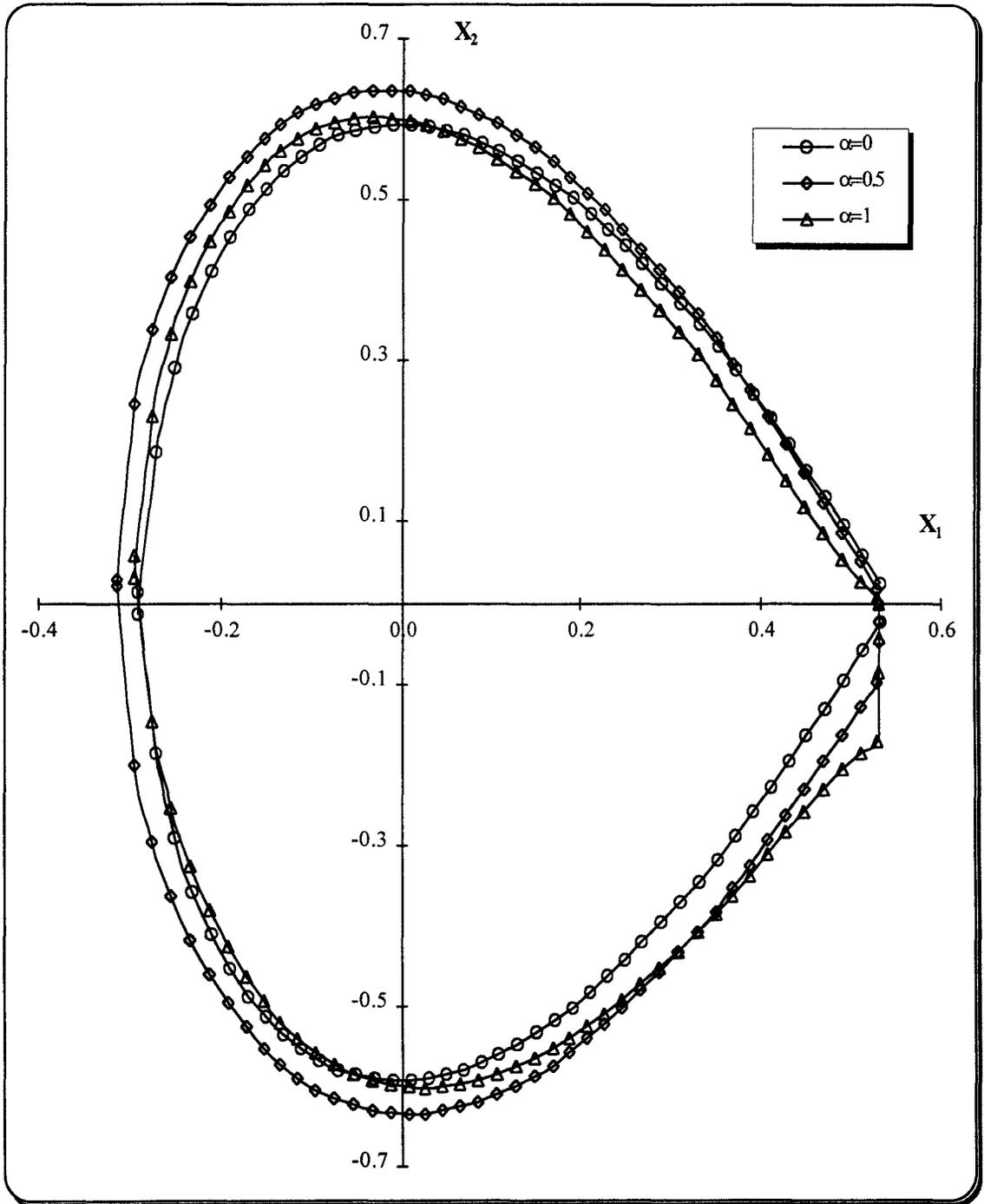


Fig. 4.20. Comparaison des Domaines de Stabilité en fonction de la Valeur de α .

La Fig. 4.21a illustre la décroissance des régions de stabilité transitoire quand la résistance statorique augmente, la machine devient de moins en moins stable vis-à-vis des perturbations. Quant à l'amortissement, il devient plus rapide pour les perturbations tolérables quand R_S diminue. La Fig 4.21b, résultats de l'algorithme de résolution numérique de l'équation (4.24), confirme ces résultats et illustre l'augmentation des régions de stabilité pour $R_S=0$ puisque la machine arrive à supporter des perturbations de charge plus amples allant de -0.42 à 0.75 rad. On déduit qu'il existe une résistance optimale, pour une même perturbation, donnant lieu à des oscillations dont l'amplitude est la plus faible.

La Fig. 4.22a montre l'effet bénéfique de l'augmentation du rapport des réactances directe et en quadrature sur la stabilité (régions de stabilité plus larges), Ceci étant dans le même sens que pour accroissement des performances de la machine.

La Fig 4.22b justifie ces conclusions et montre que pour des K_x croissants, on diminue l'amplitude et la période des oscillations et par conséquent le temps nécessaire à la machine pour amortir ces perturbations. En outre, on remarque la valeur finale de l'angle de charge de la machine, après perturbation, devient légèrement inférieur à δ_0 pour des K_x croissants.

En effet, la Fig. 4.22a montre que le maximum de la vitesse de l'angle de charge X_2 ($d\delta/dt$) à lieu pour des X_1 de plus en plus petits par rapport à δ_0 quand K_x augmente.

Sous l'effet d'une brusque variation de la charge, la machine présente une certaine marge de tolérance à cette variation on parle alors de stabilité limite ou de charge limite admissible. Les Fig. 4.23 et 4.24 représentent l'évolution de cette charge limite en fonction de R_S et K_x respectivement.

La charge limite, correspondant à une variation maximale de la charge, croît pour des K_x croissants et par conséquent les marges de stabilité sont plus larges, ce qui est en parfaite conformité avec la Fig. 4.22a. Alors qu'elle décroît pour des valeurs croissantes de R_S et par conséquent les domaines de stabilité deviennent de en plus étroits comme illustré par la Fig. 4.21a.

Les Fig. 4.25 et 4.26 représentent la valeur maximale de la tension d'alimentation, (dans le système p.u.) admissible par la machine sans perte de synchronisme. Cette tension limite augmente quand K_x croît et par suite les marges de stabilité sont de plus en plus larges. Par contre, elle est quasiment réduite à sa valeur nominale unité pour des valeurs de la résistance statorique suffisamment élevées et il en résulte un rétrécissement des domaines de stabilité de la machine à réluctance variable.

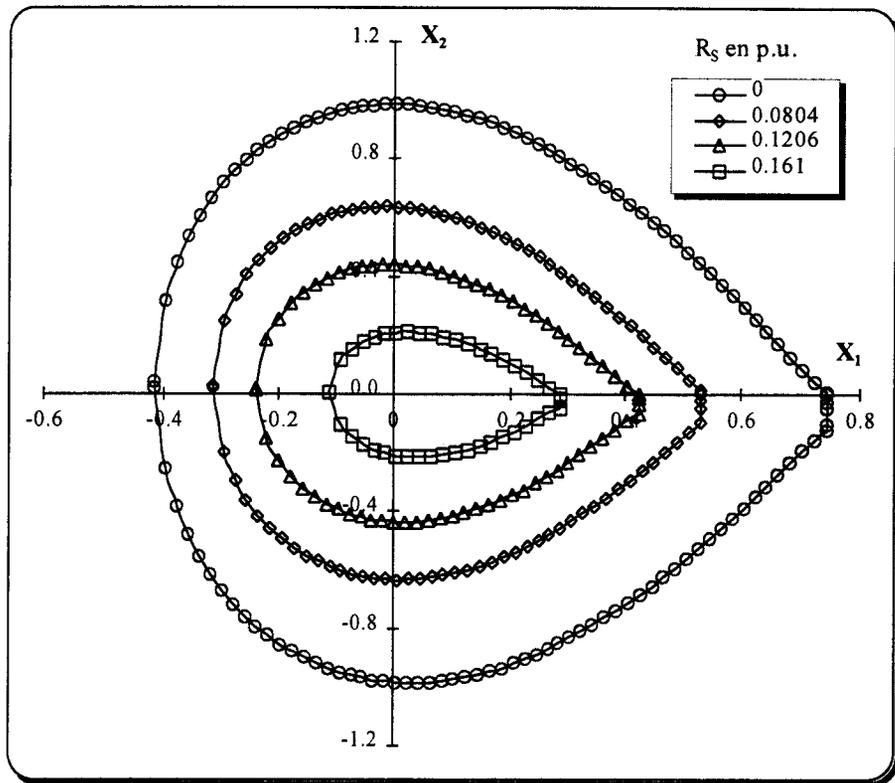


Fig. 4.21a. Domaines de Stabilité pour Différentes Résistances Statoriques.

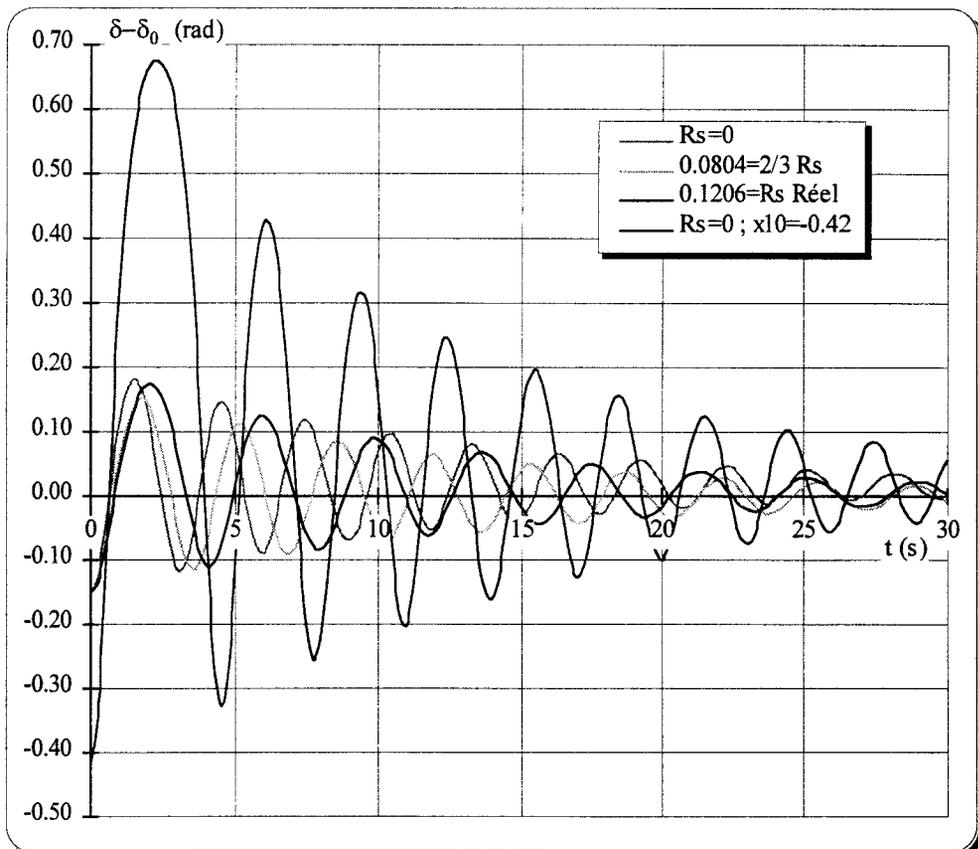


Fig. 4.21b. Effet de R_S sur le Temps de Réponse Suite à une Perturbation.

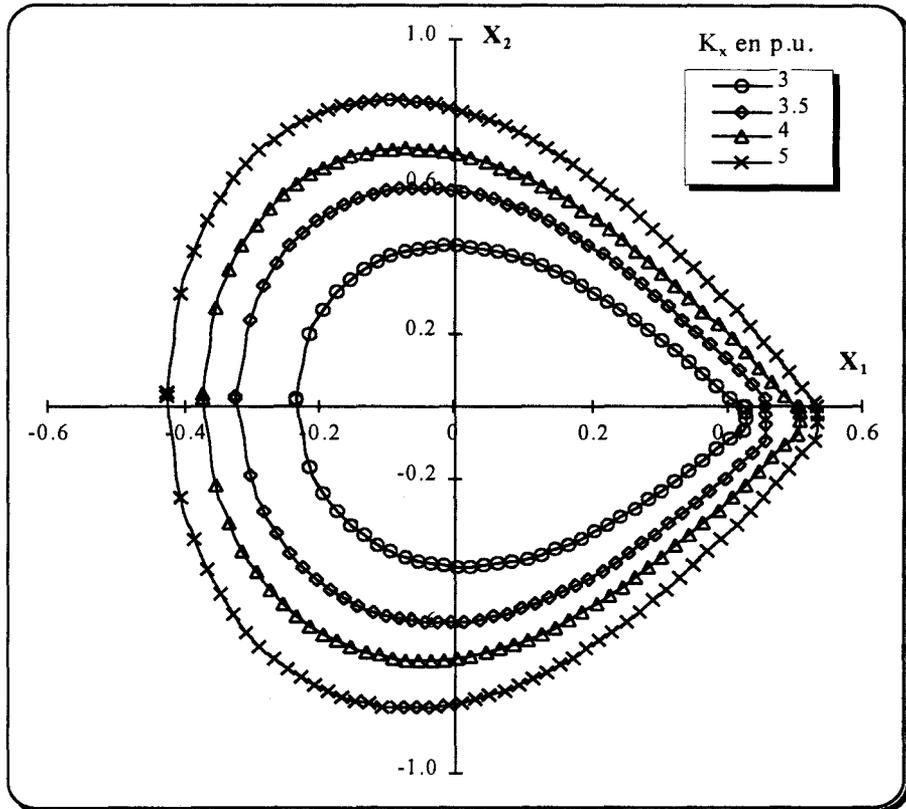


Fig. 4.22a. Domaines de Stabilité pour Différents Rapports $K_x = X_d/X_q$.

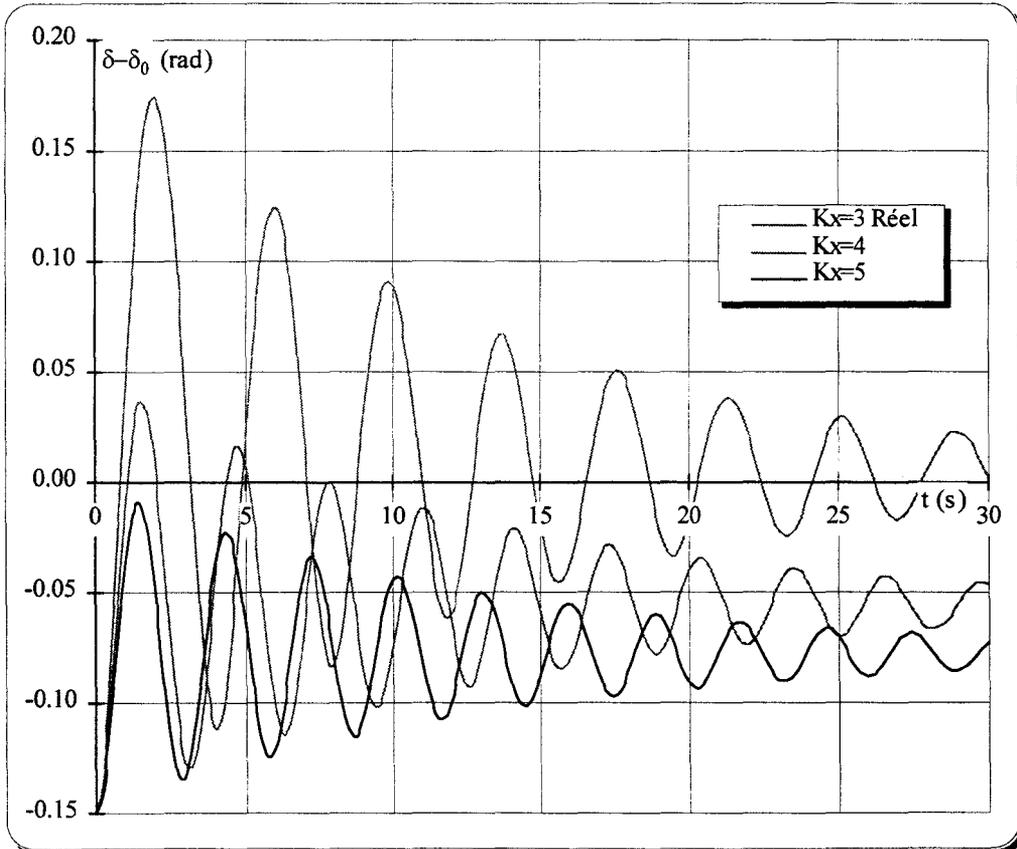


Fig. 4.22b. Effet de K_x sur le Temps de Réponse Suite à une Perturbation.

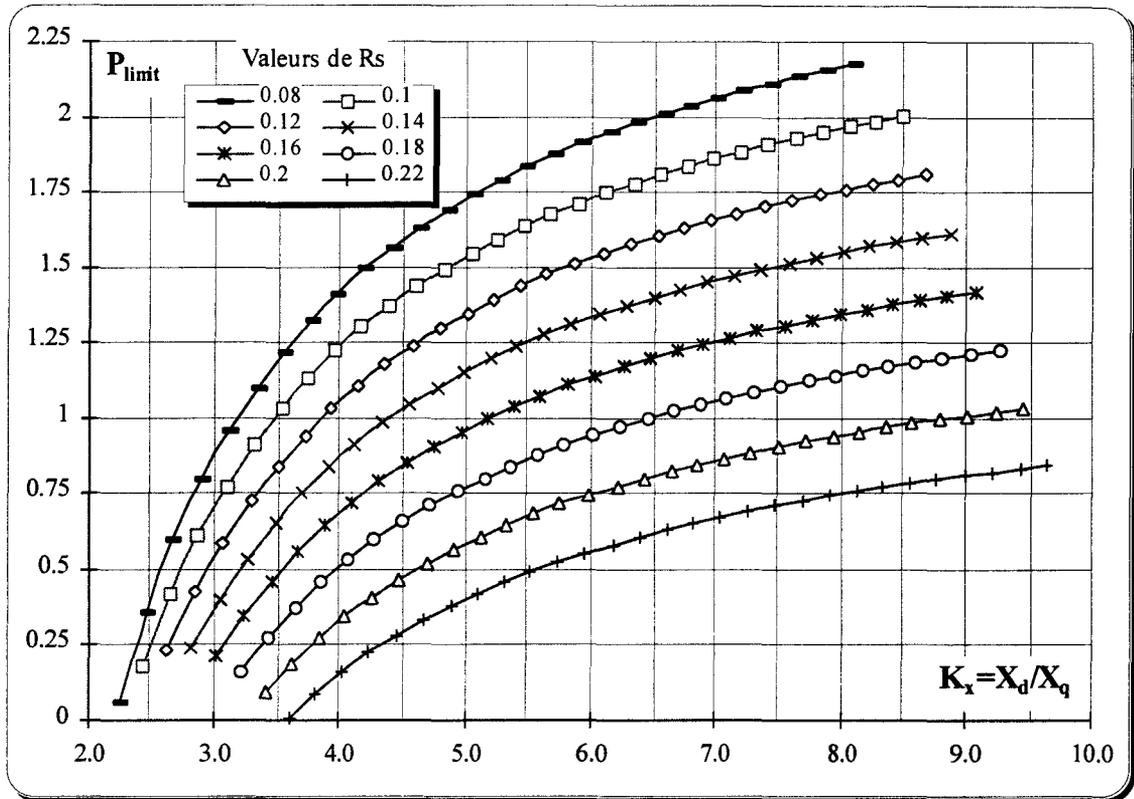


Fig. 4.23. Effet du Rapport $K_x = X_d/X_q$ sur la Stabilité Limite pour une Variation Brusque de la Charge pour Différentes Résistances Statoriques.

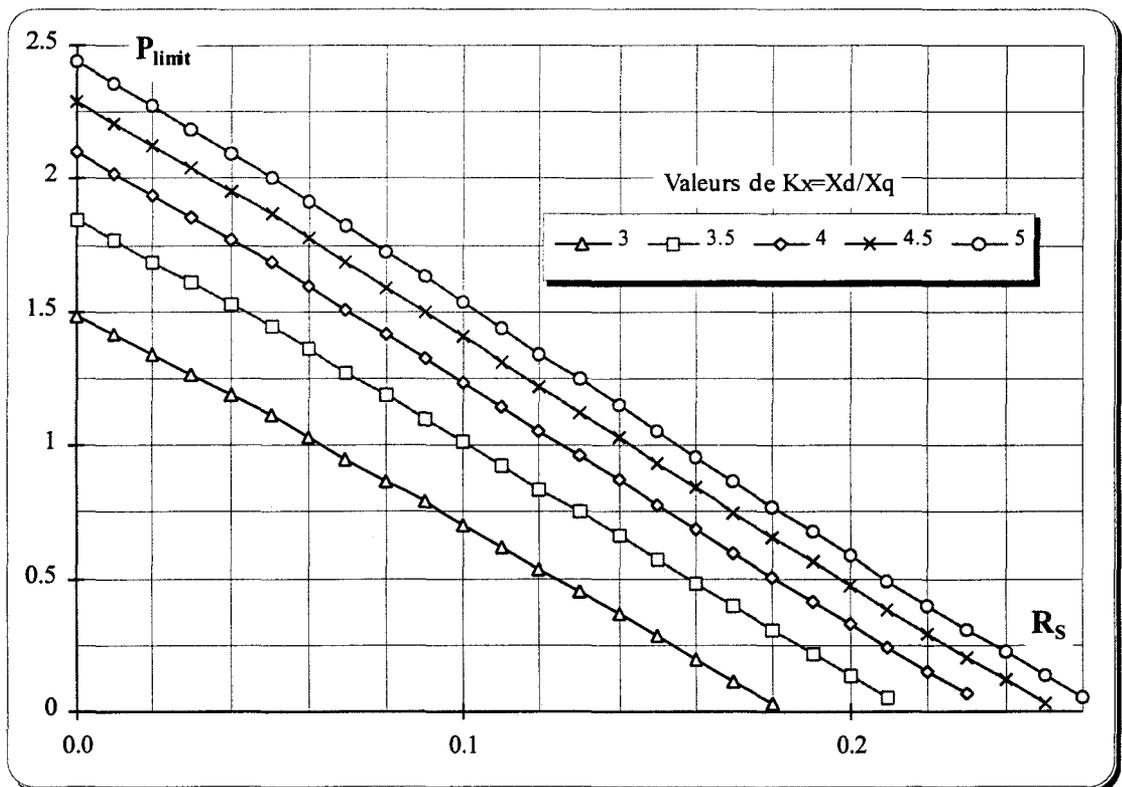


Fig. 4.24. Effet de la Résistance Statorique sur la Stabilité Limite pour une Variation Brusque de la Charge pour Différents Rapports $K_x = X_d/X_q$.

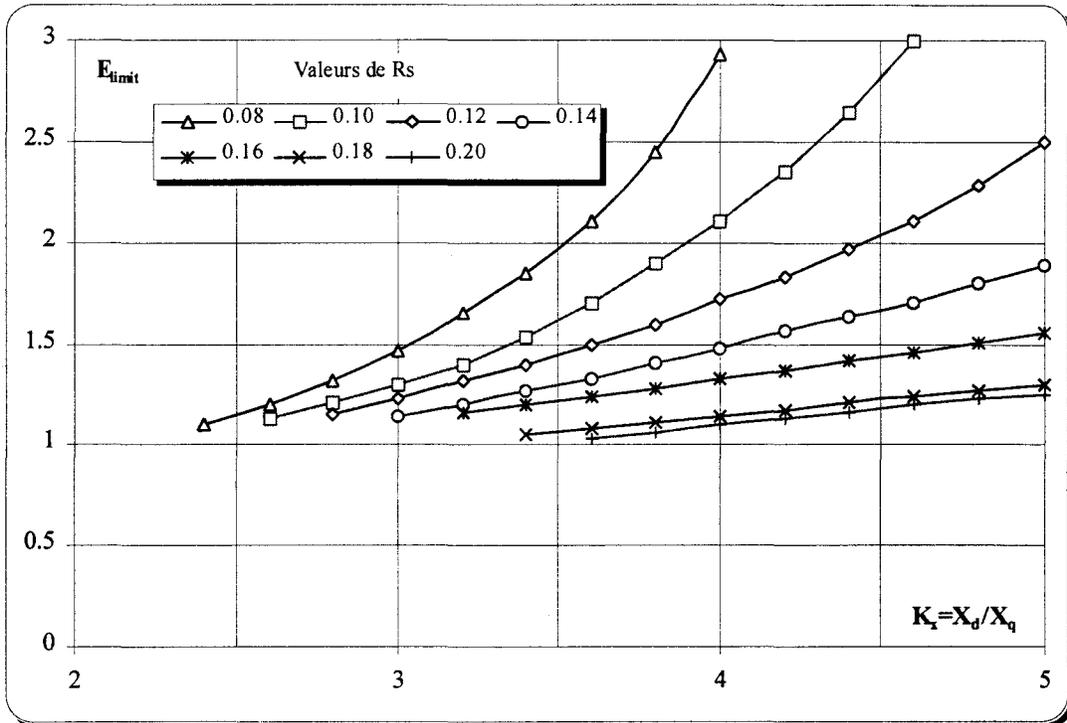


Fig. 4.25. Effet du Rapport $K_x = X_d/X_q$ sur la Stabilité Limite pour une Variation Brusque de l'Alimentation pour Différentes Résistances Statoriques.

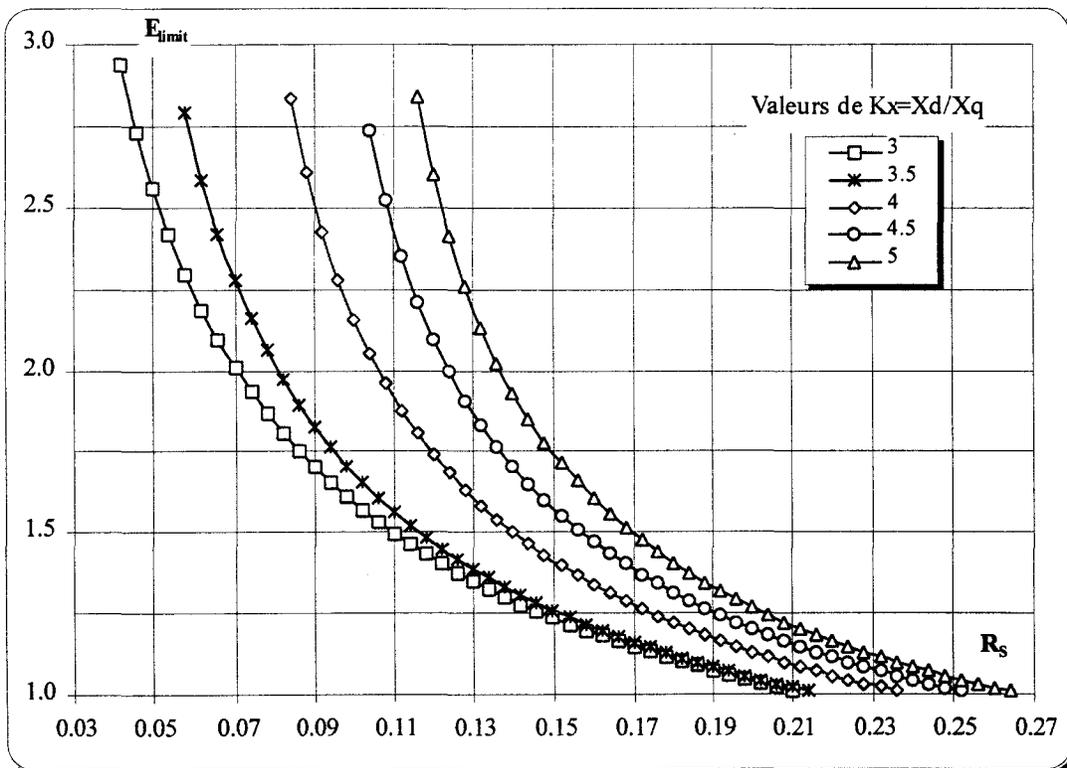


Fig. 4.26. Effet de la Résistance Statorique sur la Stabilité Limite pour une Variation Brusque de l'Alimentation pour Différents Rapports $K_x = X_d/X_q$.

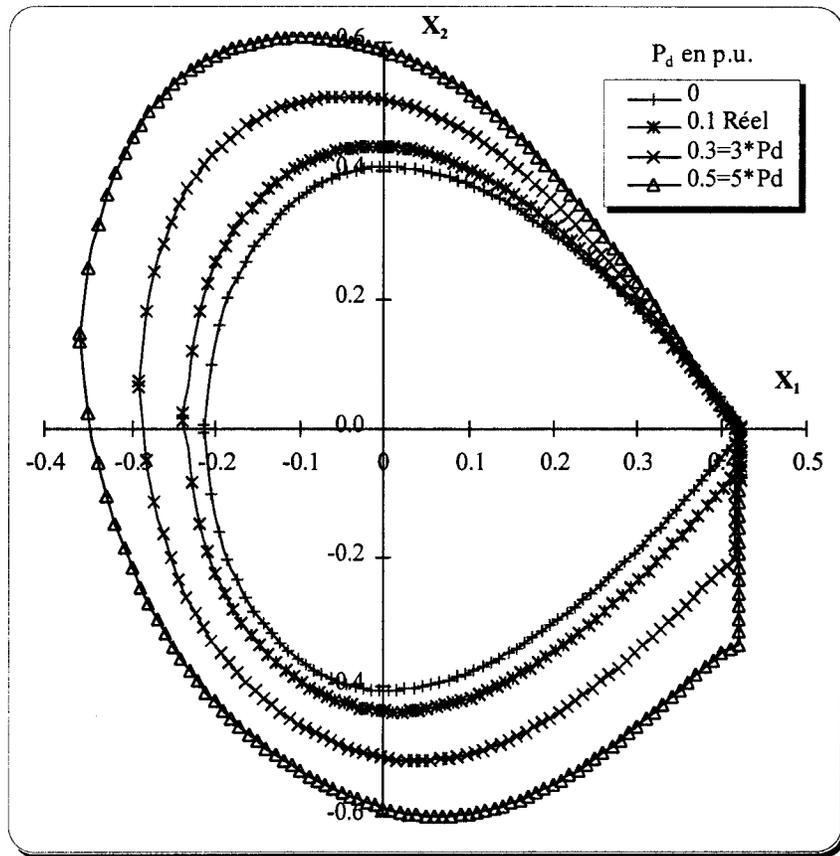


Fig. 4.27a. Effet du Coefficient d'Amortissement P_d sur les Régions de Stabilité.

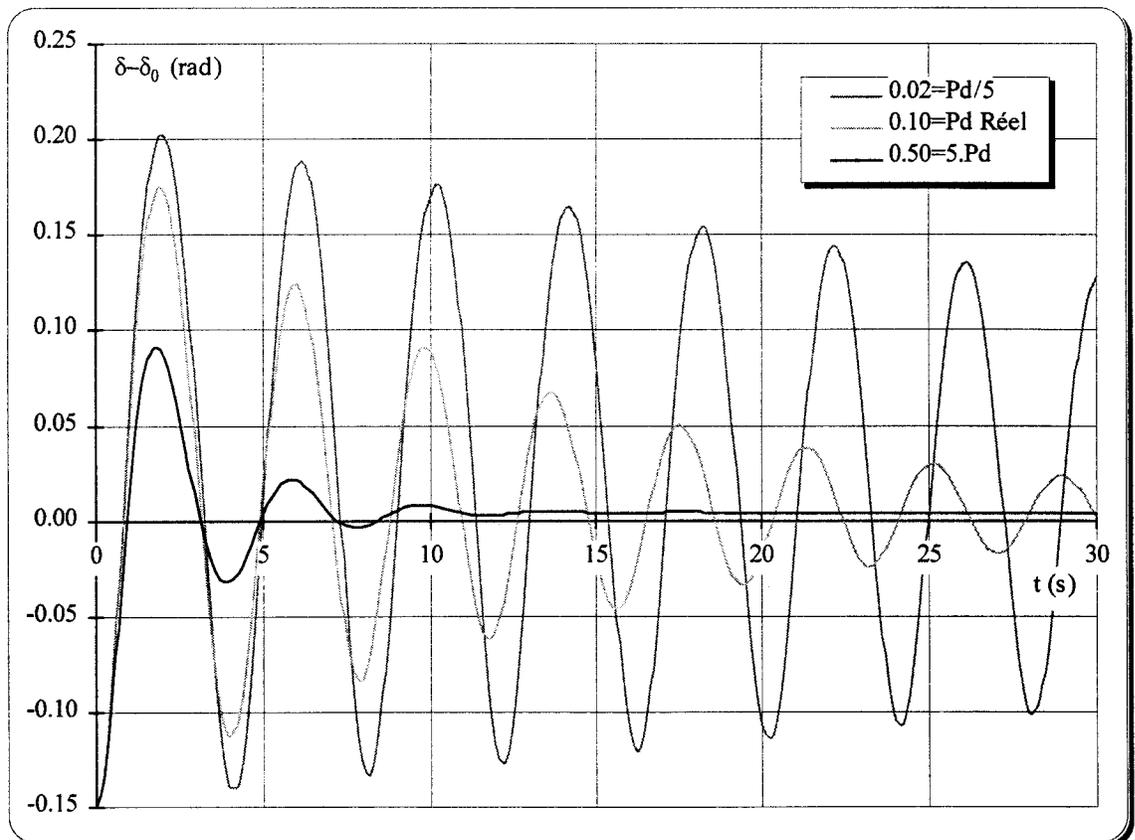


Fig. 4.27b. Effet de P_d sur le Temps de Réponse Suite à une Perturbation.

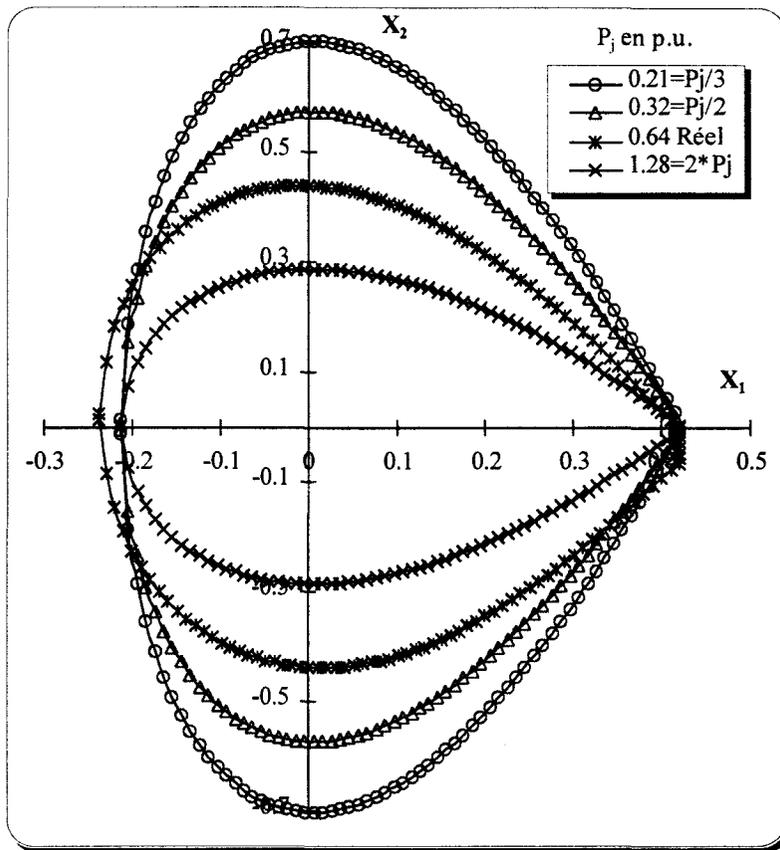


Fig. 4.28a. Effet du Coefficient d'Inertie P_j sur les Régions de Stabilité.

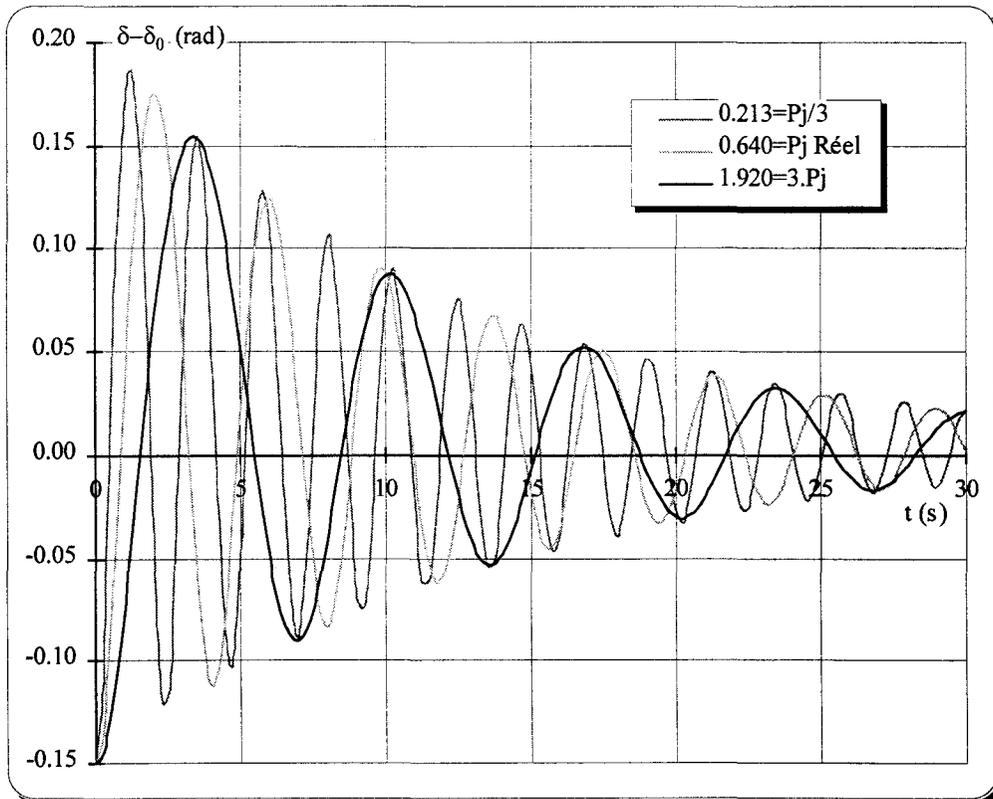


Fig. 4.28b. Effet de P_j sur le Temps de Réponse Suite à une Perturbation.

L'augmentation du coefficient d'amortissement P_d élargit les domaines de stabilité de la machine, comme illustré par la Fig. 4.27a. En plus, d'après la Fig.4.27b, quand P_d croît, on réduit l'amplitude et la période des oscillations de la machine, ainsi le temps d'amortissement de la machine se trouve considérablement réduit (5s pour $P_d'=5.P_d$), en fait P_d correspond à l'inverse du coefficient appelé facteur de qualité pour un oscillateur harmonique amorti.

L'accroissement du coefficient d'inertie P_j ne modifie pas notablement les marges de stabilité, comme le montre la Fig.4.28a, mais contribue à atténuer l'amplitude, le nombre et la période des oscillations, comme le montre la Fig. 4.28b, sans pour autant réduire le temps nécessaire à la machine pour amortir une perturbation [OSHEBA 88].

La Fig. 4.29 montre l'effet non symétrique d'une perturbation de même amplitude (+0.2 et -0.2 rad) par rapport à δ_0 . L'amplitude des oscillations est plus faible pour les perturbations positives, alors que la fréquence et le nombre des oscillations est presque le même. On retrouve bien les mêmes valeurs limites de l'angle de charge ($\delta-\delta_0$) trouvées par la méthode directe de LJAPUNOV qui sont 0.4257 et -0.2449 rad tout en remarquant le comportement de la machine à la limite de stabilité et plus précisément au point critique, constance de l'angle de charge, avant d'entamer l'amortissement.

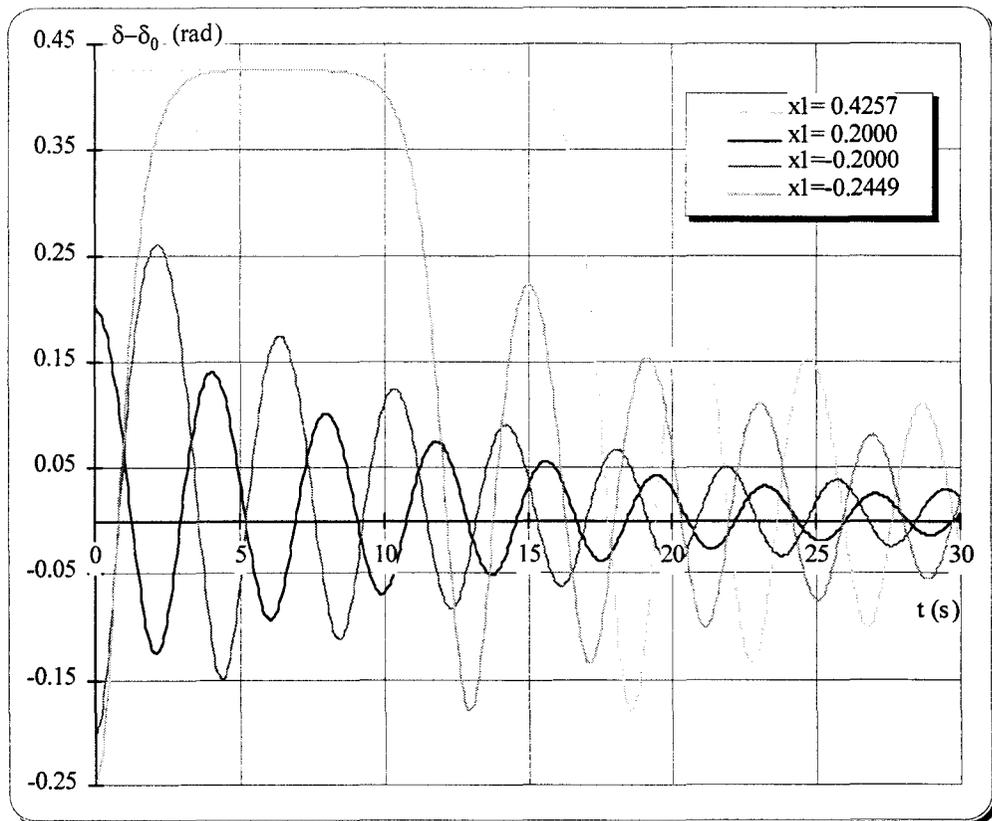


Fig. 4.29. Temps de Réponse de la Machine à Réluctance Variable
Suite à des Perturbations d'Amplitudes Différentes.

4.4 - CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, l'identification expérimentale des paramètres électriques de la machine à réluctance variable a été présentée et les différentes performances de la machine ainsi que les effets de ses paramètres sur ces performances ont été mesurés expérimentalement. Ces paramètres ont été soumis au système expert, avec ou sans utilisation d'hypothèses, et les performances évaluées par SEMAREV sont en parfaite concordance avec l'expérience.

Dans la seconde partie, l'évaluation par le système expert SEMAREV de la stabilité transitoire d'une machine à réluctance variable, dont les paramètres sont issus de la bibliographie, pour des perturbations de grande amplitude, et l'influence des paramètres de la machine sur cette stabilité ont été présentées puis comparées avec les résultats de la résolution numérique de l'équation de mouvement. La stabilité transitoire déterminée par SEMAREV est en conformité avec celle évaluée par la résolution numérique de l'équation de mouvement de la machine à réluctance variable.

Les solutions à apporter à ces problèmes de stabilité, déduites des résultats et conclusions précédents, pour une machine déjà conçue, telle que l'adjonction d'inductances s'avère efficace tout en ayant des effets secondaires tel que la réduction du couple maximum et l'augmentation du coût d'investissement pour les changements à introduire dans le circuit de puissance. On trouvera des solutions qui consistent en une boucle de vitesse, nécessitant un tachymètre, normalement non nécessaire pour une MRV, afin d'agir sur la tension d'alimentation de l'onduleur pour stabiliser la machine [KRAUSE 68]. D'autres envisagent de faire varier la fréquence d'alimentation de l'onduleur pour pouvoir changer l'angle de charge interne de la machine [VUCKOVIC 88]. Ainsi, il s'avère certainement que la meilleure solution à tous ces problèmes réside dans les résultats d'évaluation des performances et d'analyse de stabilité des machines à réluctance variable. En effet, ces résultats forment un guide précieux pour une meilleure optimisation de leurs paramètres afin de permettre la conception de machines suffisamment stables avec des performances transitoire et stationnaire hautement améliorées.

Les différents cas d'évaluations de performances et d'analyses de stabilité traités ont mis en évidence d'une part la validité et la cohérence de la base de connaissances précédemment élaborée par comparaison des résultats du système expert avec ceux issus des essais expérimentaux, et d'autre part la convivialité du système expert lui-même.

D'une façon générale, la validation par le biais des différents essais et par comparaison avec les principaux résultats trouvés par d'autres méthodes dans différentes publications dans le même domaine nous a amenés à un affinement tant qualitatif que quantitatif du prototype et à une amélioration du système, globalement, et de l'interface utilisateur plus particulièrement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

À travers ce mémoire, nous avons abordé plusieurs problèmes liés à l'utilisation des techniques de systèmes experts en ingénierie électrique comme outil d'aide à la décision. Plus particulièrement, on a élaboré un système expert (SEMAREV) permettant l'évaluation des performances et l'analyse de stabilité des Machines à Réductance Variable en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses.

Le produit système expert SEMAREV, présenté dans ce mémoire, répond à des besoins bien spécifiques dans le domaine des machines à réductance variable. Un certain nombre de ces besoins a été exprimé et le mémoire est une contribution à la recherche de solutions d'aide à la décision pour l'analyse de stabilité et l'évaluation des performances des MRV pour les spécialistes de la MRV voire même pour une évaluation et une compréhension des références bibliographiques du domaine. En outre, il constitue un excellent outil d'enseignement de ces machines, avec utilisation d'hypothèses, illustré par des graphiques de performances et des courbes de stabilité tout en fournissant les explications des résultats et des conclusions fournis.

L'architecture du produit a été élaborée tout en respectant un objectif primordial de réutilisation de la majeure partie des modules pour d'autres applications à d'autres machines tournantes électriques. On a montré, précisément dans le dernier chapitre, la cohérence de la base de connaissances élaborée et la faisabilité d'un tel système expert pilote en prouvant que ces performances sont largement satisfaisantes par comparaison avec celles obtenues à partir d'essais expérimentaux sur des machines à réductance variable.

Ce travail a été exclusivement basé sur le modèle de PARK. Certes, les équations de PARK représentent un outil d'étude performant pour des machines à répartition sinusoïdale des courants et des flux, surtout dans notre cas qui constitue une première approche pour développer un tel système expert et pour démontrer sa faisabilité. Mais, il faut aborder l'étude de ces machines à l'aide de nouvelles méthodes de simulation basées sur une modélisation par circuits magnétiques équivalents, vu que la plupart des machines à réductance variable alimentées par convertisseurs ne répondent pas aux hypothèses de PARK susmentionnées. Ces nouvelles méthodes de simulation sont applicables a fortiori aux machines à répartition sinusoïdale et présentent l'intérêt de permettre une détermination directe de l'influence des paramètres de construction sur le comportement de l'ensemble convertisseur-machine [SARGOS 81].

Bien que les effets d'une application système expert ne soient pas tous prévisibles et que les gains sont difficiles à quantifier, on peut penser que les bénéfices de ce système, dans sa version actuelle, et au-delà de la simple évaluation de performances ou la

prédiction de stabilité d'une MRV, se répercuteront sur la conception, le dimensionnement et l'optimisation de la machine en associant cet outil avec d'autres logiciels de conception ou en procédant à une extension de système expert, ce qui pourra faire l'objet de plusieurs travaux ultérieurs.

L'impact doit aussi être du côté du cognitif. En effet, le développement de ce système expert pilote a consolidé notre expérience dans les méthodes et outils de l'ingénierie de la connaissance. En outre, il a permis de mieux cerner les potentialités de cette nouvelle technologie, qui sans nul doute a beaucoup à offrir dans le domaine de l'électrotechnique et plus particulièrement en ce qui concerne les machines à réluctance variable à l'heure où les notions de machines suffisamment stables avec d'excellentes performances transitoires et stationnaires prennent de plus en plus d'importance.

Au terme de ce travail, nous pensons avoir démontré l'utilité d'un tel système expert pour l'évaluation des performances et l'analyse de stabilité des machines à réluctance variable notamment quand une ou plusieurs hypothèses ont été supposées valables et cette approche est tout à fait satisfaisante et bien adaptée. Il est bien évident qu'il y a de nombreuses perspectives à ce travail, à savoir :

- la réalisation d'une nouvelle version du présent système expert fonctionnant dans l'environnement WINDOWS pour tirer la meilleure partie de l'interface graphique de ce dernier et surtout qu'une version de PROLOG pour WINDOWS vient d'être mise sur le marché,
- l'interfaçage de ce système expert avec d'autres logiciels existants notamment pour l'aspect de conception de la machine ou de dimensionnement de son convertisseur. En effet, il serait très intéressant de pouvoir directement introduire les paramètres de la machine, résultats de la conception et selon le cahier des charges pour déterminer les performances et faire par la suite les rebouclages nécessaires jusqu'à satisfaction des critères exigés,
- l'adaptation de ce système aux autres types de machines électrique tournantes (synchrone, asynchrone, à courant continu) d'autant plus que cet aspect a été inhérent et intrinsèque au présent prototype,
- la réalisation d'un nouveau système expert avec l'environnement WINDOWS regroupant tous ces travaux d'extensions, et plus particulièrement l'aide à la conception et au dimensionnement du convertisseur des machines à réluctance variable, nous paraît comme étant la suite naturelle au présent travail.

ANNEXES

ANNEXE 1 : PANORAMA DES GÉNÉRATEURS DE SYSTÈMES EXPERTS

ANNEXE 2 : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE LA FONCTION DE LIAPUNOV

ANNEXE 3 : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DE MOUVEMENT DE LA MRV

ANNEXE 1 : PANORAMA DES GÉNÉRATEURS DE SYSTÈMES EXPERTS

Ces techniques suscitent aujourd'hui un vif intérêt qui correspond à l'apparition sur le marché d'outils permettant de développer des systèmes experts sur micro-ordinateurs.

Une caractéristique souvent prise en compte pour le choix d'un tel outil de développement ou "Shell" est la réputation acquise du logiciel lors d'applications précédentes, c'est pourquoi nous présentons dans cette annexe certains de ces outils, disponibles lors du début de notre travail, et quelques applications.

A1.1 - KES-SOFTWARE A & E

Les domaines d'applications de Knowledge Engineering System sont très divers : environnements commerciaux, industriels, universitaires et administratifs.

KES fonctionne aussi bien sur des stations de travail telles que Micro Vax, Appolo et Sun que sur des micro-ordinateurs IBM et compatibles. Il a été mis en œuvre avec le langage de programmation C.

On peut citer trois parmi les systèmes experts élaborés en utilisant KES :

- CDC (Dump Analysis Expert System), analyseur de vidage de mémoire, a été développé par Control Data et Software A & E pour le diagnostic des pannes de System Cybex NOS-VE. Il détermine qui, du matériel ou du logiciel, est responsable de la panne, quelle partie du matériel ou quel problème lié au système d'exploitation et, dans le cas du logiciel, il détermine quel projet ou module est responsable. La base de connaissance de ce système expert contient plus de 800 règles.
- Pour le compte de l'Agence de Protection de l'Environnement et les autorités locales des États Unis, Software A & E a conçu un système expert d'aide à la décision dans l'examen et l'attribution du permis de déversement d'eaux usées. Le système expert permet d'accélérer le processus d'examen et de réaliser l'interface avec les applications bases de données existantes. Il est

opérationnel sur micro-ordinateur directement relié à DBase III. Il s'agit d'un système à base de règles combinant les réglementations de l'EPA avec une connaissance heuristique pour aider à déterminer si un demandeur remplit toutes les conditions de la réglementation.

- Un système expert de planification de missions tactiques a été élaboré pour le compte des services topographiques de l'armée américaine dans le domaine de commandement et du contrôle d'un champ de bataille.

Le système traite le cas de la planification de la reconnaissance hypothétique d'un champ de bataille. Il détermine les endroits du terrain à choisir pour installer l'artillerie, étant donné la stratégie de déploiement de l'ennemi et les caractéristiques du terrain. Ces informations peuvent être utilisées pour planifier une mission de reconnaissance.

A1.2 - INFERENCE ART-SYSECA

ART, développé par Inference Corporation à Los Angeles, est un environnement de développement de systèmes experts destiné à l'industrie et aux services. Il a été lancé sur le marché américain au début de l'année 1985. C'est un langage compilé permettant la conception de systèmes experts temps réel, il fournit de quoi exprimer les concepts fondamentaux : traitements parallèles, synchronisation et communication entre processus.

A1.3 - COGNITIF / COGNITECH

Cognitech a conçu un outil dénommé Cognitif visant à permettre la réalisation rapide de systèmes experts, sa portabilité (PC, Macintosh, Dec, Sun, Appolo) permet de l'utiliser depuis le prototypage jusqu'au système opérationnel. Cognitech utilise exclusivement le langage LISP.

Il a été utilisé pour plus de 60 réalisations dans des secteurs aussi variés que l'industrie, la banque, l'assurance, le secteur nucléaire, l'informatique, l'agro-alimentaire, l'automobile, la médecine et le bâtiment.

A1.4 - INTELLIGENCE SERVICE / GSI-TECSI

Gsi-Tecsi a conçu l'outil Intelligence Service pour permettre le développement de systèmes experts sur micro-ordinateur ou sur station Vax. Plus d'une centaine d'applications ont été développées en utilisant cet outil depuis l'année 1986 dans différents domaines tels que l'analyse de situation bancaire, le diagnostic de pannes en aérospatiale et l'aide à la décision pour le choix d'outils de fraisage chez Renault.

Intelligence Service offre un bon compromis entre les systèmes d'initiation et les logiciels haut de gamme comme Art, Kee et Knowledge Craft qui sont nécessaires pour des applications complexes mais qui demandent un investissement initial plus important.

A1.5 - EXPERTKIT II / ACT-INFORMATIQUE

Act Informatique a réalisé ExpertKit II, un générateur de systèmes experts utilisant l'environnement Macintosh, écrit totalement en LISP. Son moteur d'inférence est d'ordre 1 (avec variables). Outre le formalisme habituel de représentation de connaissances, les règles de production, il est possible de modéliser la connaissance structurée en utilisant des schémas. ExpertKit II est utilisé pour de nombreuses applications industrielles et dans plusieurs centres de formations aux techniques de l'intelligence artificielle.

Parmi les réalisations on peut citer :

- la Compagnie Générale des Eaux qui a élaboré un système d'auto-apprentissage pour l'analyse des boues de recyclage des eaux usées.
- Kodak qui a réalisé un système expert en sensitométrie pour le traitement de films Kodachrome lors de l'apparition d'une dérive de couleur pendant le développement photographique des diapositives.

Expertkit II est disponible actuellement sur Macintosh, micro-ordinateur et station de travail Vax.

A1.6 - GURU / MICRO DATA BASE SYSTEMS

Guru a été réalisé par Micro Data Base Systems aux États Unis et est disponible sur micro-ordinateur uniquement. Il est écrit en C et en Assembleur avec une grande rapidité d'exécution. Il est distribué depuis 1986 et utilisé dans plusieurs applications :

- Aide à la conception : sur les plans techniques (Architecture) et coûts de bâtiments, aide à la conception d'ensembles d'équipements industriels,
- Aide à la décision : système expert d'analyse du risque clients (Crédit Manager), aide à la création d'entreprises dans le domaine administratif, analyse de la situation financière d'une exploitation agricole en vue de l'attribution d'un prêt,
- Diagnostic & Maintenance : diagnostic physiopathologique et clinique sur la base de dosage de protéines du sang. Aide à la conduite des procédés automatisés en industrie manufacturière, pour l'acquisition en temps réel des données sur l'état du procédé et la participation au contrôle commande sur certaines fonctions telle que la qualité des produits. Diagnostic des problèmes d'usinage déterminant les causes des problèmes rencontrés lors de l'usinage d'une pièce et préconisant les remèdes. Aide au réglage des machines de production dont la mise au point pose un grand problème à des opérateurs peu spécialisés. Analyse des défauts dans le verre à partir des rebuts, système expert d'aide à la conduite de fours dans une aciérie.

A1.7 - OURSE-PROLOGIA

Prologia a réalisé le générateur de systèmes experts Ourse en utilisant Prolog. Il a été utilisé dans le domaine administratif et public avec un système d'aide au financement sur fonds publics et dans le domaine bancaire avec un système d'aide à l'attribution de prêt à la consommation. Il est disponible sur micro-ordinateur, Macintosh et station Vax.

A1.8 - NEXUS / MIND SOFT

NEXUS permet de développer des applications informatiques, qui rendent les connaissances d'un expert plus productives et de plus en plus compréhensives, dans divers domaines : industriel, financier, économique, scientifique, gestion, etc. Il permet aussi bien d'analyser, qu'expertiser, décider ou diagnostiquer.

Le moteur d'inférence est d'ordre 1, c'est à dire qu'il possède une grande capacité de raisonnement. Le mécanisme d'inférence s'appuie sur trois stratégies : chaînage avant, chaînage arrière et chaînage mixte.

Il offre un environnement multi-fenêtres avec menus déroulants. Un choix de fenêtres dans le menu principal donne accès à un environnement spécifique et homogène.

La représentation des connaissances est de type hybride sous forme de règles de production enrichies et d'actions (procédures et fonctions) à base d'un langage structuré et typé de la famille Pascal / Modula-2.

NEXUS est disponible sur micro-ordinateur et Apple Macintosh.

A1.9 - SIVA 3.0 / INTELLITEC

SIVA est un outil logiciel permettant de saisir, de mettre au point et d'exploiter d'importantes quantités de connaissances afin de générer des systèmes experts.

Le moteur d'inférence, d'ordre 0⁺, est un de ses points forts, en effet il possède de multiples fonctionnalités lui permettant de construire des raisonnements pertinents.

Il dispose des trois modes de raisonnement standards : chaînage avant, chaînage arrière et chaînage mixte.

Il utilise, pour représenter la connaissance, les règles de productions, les métarègles, les liens sémantiques et les objets ou prototypes.

SIVA est disponible sur micro-ordinateur uniquement. Parmi les applications opérationnelles, développées avec SIVA, on trouve des applications dans le secteur tertiaire (gestion, assurance, finances, droit, immobilier, marketing, gestion du personnel, ...) et dans le domaine scientifique et technique (médecine, informatique et électronique, prospection géologique, agriculture, chimie, aviation, CAO, ...).

A1.10 - M1 / TEKNOLEDGE-FRAGMENTEC

M1 est adapté à la conception et au développement de systèmes experts autonomes sur ordinateurs individuels.

Le moteur d'inférence est d'ordre 1, les prémisses des règles pouvant contenir des prédicats dont les objets sont remplacés par des variables.

M1 dispose d'une interface ingénieur de connaissances et d'une interface utilisateur tous deux à base de menus déroulants avec une aide en ligne.

Le mode de raisonnement est exclusivement le chaînage arrière avec la possibilité de coder la connaissance incertaine en associant des facteurs de certitude aux faits et aux règles.

A1.11 - SNARK OPEN / SINAPSE

Le moteur d'inférence fonctionne en chaînage avant avec deux modes : continu et explication. SNARK OPEN intègre un fonctionnement basé sur la logique des prédicats (ordre 0, 1 et 2) et les mécanismes de méta-connaissance pour une structuration dynamique de la base de connaissance afin de diriger le fonctionnement du moteur.

Il permet l'appel de procédures et fonctions externes écrites et compilées dans un langage évolué tel que Pascal, Fortran, C et Assembleur.

SNARK OPEN est implanté aussi bien sur micro-ordinateur que sur station de travail.

A1.12 - SECIA / SECIA EXPERT

Son moteur d'inférence est d'ordre 1 fonctionnant en chaînage avant, arrière et mixte. La représentation des connaissances est basée sur les règles de production qui peuvent être rentrées sous forme de circuits logiques.

Il est disponible sur micro-ordinateur et sur station de travail sous UNIX.

A1.13. - GENESIA 2 / STERIA

C'est un générateur de systèmes experts pour les grands secteurs d'applications industrielles et de gestion.

Le moteur d'inférence, d'ordre 2, fonctionne en chaînage avant. La représentation des connaissances est basée sur les objets structurés, les réseaux sémantiques et les frames. GENESIA 2 permet de gérer des objets structurés non typés et de leur attribuer un état considéré lui même comme un objet complexe.

Il est disponible sur micro-ordinateur et sur station de travail.

A1.14 - NEXPERT OBJECT / NEURON DATA

Le moteur d'inférence, d'ordre 0⁺, fonctionne en chaînage avant, arrière et mixte. La représentation des connaissances est basée sur des objets spécifiques qui correspondent à une réalité donnée.

NEXPERT OBJECT dispose d'une interface graphique conviviale et très performante incluant un éditeur de règles.

Il s'est avéré qu'il est particulièrement approprié pour traiter des problèmes complexes de l'industrie : Renault Automation l'utilise pour gérer des robots manipulateurs.

La société SEEE l'utilise pour assurer la sécurité des bâtiments publics en ce qui concerne les incendies et les inondations.

Il est disponible sur micro-ordinateur, station de travail VAX et Macintosh.

A1.15 - ALCEE / ACASTE

ALCEE possède un moteur d'inférence d'ordre 2, avec chaînage avant et retour arrière par restauration d'états.

Il utilise les méta-connaissances et le mécanisme de frames. Il est constitué de trois modules : le module éditeur-compileur de la base de connaissances, le module test pour contrôler l'exécution et le module d'exploitation des connaissances pour livrer un système fermé (sans modification de la base de connaissance).

Il a été utilisé dans différents domaines tels que le domaine financier (crédit, analyse financière et gestion prévisionnelle) et l'industrie (contrôle de processus, configuration et diagnostic).

Il n'est disponible que sur micro-ordinateur.

ANNEXE 2 : RÉSOLUTION NUMÉRIQUE DE LA FONCTION DE LJAPUNOV

L'objet de cette annexe est de donner la démarche suivie pour obtenir toute les courbes de stabilité par la méthode directe de LJAPUNOV et de présenter les principaux algorithmes utilisés.

A2.1 - ÉQUATION DE MOUVEMENT DE LA MRV

L'équation de mouvement de la machine à réluctance variable dans un repère lié au rotor, en négligeant les pertes fer, les pertes mécaniques et l'effet de saturation, et en exprimant tous les paramètres de la MRV en grandeurs réduites (p.u.), est donnée par :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} + \frac{1}{P_j} (P_0 - P_\ell) = 0 \quad (A2.1)$$

où on désigne par K_d le rapport $\frac{P_d}{P_j}$.

La puissance synchrone P_0 est exprimée comme suit :

$$P_0 = \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_S^2)^2} \left\{ (X_d X_q - R_S^2) \cdot \sin(2\delta) + R_S(X_d + X_q) \cdot \cos(2\delta) - R_S(X_d - X_q) \right\} \quad (A2.2)$$

L'équation A2.1 est une équation différentielle non linéaire de second ordre avec un coefficient d'amortissement proportionnel à K_d .

A2.2 - FONCTION DE LJAPUNOV ASSOCIÉE À L'ÉQUATION DE MOUVEMENT DE LA MRV

Si on suppose que, dans l'équation de mouvement (A2.1), l'angle de charge interne $\delta=\delta_0$ correspond à un point de fonctionnement stable en régime établi, alors on peut introduire deux variables d'état x_1 et x_2 définies par :

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \frac{d\delta}{dt} \end{cases} \quad (A2.3)$$

L'expression (A2.1) peut alors se mettre sous la forme du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} + K_d x_2 + g(x_1) = 0 \end{cases} \quad (A2.4)$$

Soit encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -K_d x_2 - g(x_1) \end{bmatrix} \quad (A2.5)$$

où :

$$g(x_1) = \left[\frac{1}{P_j} \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_S^2)} \left\{ (X_d X_q - R_S^2) \cdot \sin 2(x_1 + \delta_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + R_S(X_d + X_q) \cdot \cos 2(x_1 + \delta_0) - R_S(X_d - X_q) \right\} - P_\ell \right] \quad (A2.6)$$

La fonction de LJAPUNOV, donnant lieu à des régions de stabilité plus larges, se rapprochant beaucoup plus des domaines réels, que ceux trouvées par les fonctions classiques, construite depuis [MIYAGI 80] peut être écrite comme suit :

$$V = \frac{1}{2}(x_2 + \alpha K_d x_1)^2 + \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1 - \alpha) x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du + 2K_d \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \int_0^{x_1} \sqrt{u g(u)} du \quad (A2.7)$$

L'expression de sa dérivée s'écrit tout simplement :

$$\dot{V} = -\phi = -K_d [x_2 \sqrt{(1-\alpha)} - \sqrt{\alpha x_1} g(x_1)]^2 \quad (\text{A2.8})$$

En sachant que la condition suivante doit être remplie :

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{A2.9})$$

La fonction ainsi obtenue vérifie bien tous les critères exigés par LJAPUNOV POUR permettre une évaluation correcte de domaines de stabilité et d'instabilité de la machine.

A2.3 - RÉOLUTION NUMÉRIQUE DE LA FONCTION DE LJAPUNOV

Tout d'abord il faut trouver le point d'équilibre instable x_{1C} , appelé aussi point critique au sens de LJAPUNOV. Ceci nécessite la résolution numérique, puisqu'il n'existe pas de solutions analytiques, de l'équation (A2.10) suivante, dont x_{1C} est la racine :

$$g(x_1) = 0. \quad (\text{A2.10})$$

L'algorithme de résolution numérique qu'on a employé est celui de NEWTON-RAPHSON, donné par la Fig. A2.1.

Pour Résoudre $g(x_1)=0$ avec une Approximation Initiale p_0 :

Entrées : l'approximation p_0 , la Tolérance TOL et le nombre maximum d'itérations N_0 .

Sorties : la Solution Approximative p ou Echec.

Étape 1 : Mettre $I=1$.

Étape 2 : Tant que $I \leq N_0$ Faire les Étapes de 3 à 6.

Étape 3 : Mettre $p = p_0 - g(p_0)/g'(p_0)$ (Calculer p_i).

Étape 4 : Si $|p - p_0| < \text{TOL}$ Alors Sortir (p) et STOP.

Étape 5 : Mettre $I = I + 1$.

Étape 6 : Mettre $p_0 = p$ (Mise à jour de p_0).

Étape 7 : Sortir("Echec après N_0 Itérations ! ") et STOP.

Fig. A2.1 Algorithme de NEWTON-RAPHSON.

En utilisant les valeurs des paramètres suivants de la MRV en grandeurs réduites :

$$\begin{array}{lll}
 R_S=0.1206 \text{ p.u.} & X_d=1.397 \text{ p.u.} & X_q=0.463 \text{ p.u.} \\
 P_j=0.640 \text{ p.u.} & K_d=0.1563 \text{ p.u.} & E=1.000 \text{ p.u.}
 \end{array}$$

On trouve la valeur $x_{1C}=0.4257$ comme solution de l'équation (A2.10), pour laquelle la fonction de LJAPUNOV est maximale, et par suite on aura $x_{2C}=0$.

Le nombre d'itérations maximal était 1000 avec une tolérance égale à 10^{-6} .

On substituant les valeurs de x_{1C} et de x_{2C} dans l'équation (A2.7) on trouve la valeur maximale prise par $V(x)$.

Pour cela, il faut calculer numériquement les valeurs des deux intégrales contenues dans l'équation (A2.7). On a adopté l'algorithme de SIMPSON, illustré par la Fig. A2.2, pour des raisons de simplicité de la mise en œuvre, de stabilité de la méthode et de précision des résultats obtenus par comparaison à celles des rectangles, des trapèzes et de ROMBERG.

Pour Calculer Numériquement l'Intégrale $I = \int_a^b f(x).dx :$

Entrées : Les Points de l'Intervalle a et b et un Entier Naturel Positif N.

Sorties : l'Approximation XI de I.

Étape 1 : Mettre $h=(b-a)/N$.

Étape 2 : Mettre :

$XI0=f(a)+f(b),$
 $XI1=0,$
 $XI2=0.$

Étape 3 : Pour $I=1,2, \dots, N-1$ Faire les Étapes 4 et 5.

Étape 4 : Mettre $X=a+I*h.$

Étape 5 : Si I est Pair Alors Mettre $XI2=XI2+f(X)$
 Sinon, Alors Mettre $XI1=XI1+f(X)$

Étape 6 : Mettre $XI=h*(XI0+2.XI2+4.XI1)/3.$

Étape 7 : Sortir(XI) et STOP.

Fig. A2.2 Algorithme d'Intégration Numérique de SIMPSON.

La valeur maximale V_{\max} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{\max} = \frac{1}{2}(x_{2C} + \alpha K_d x_{1C})^2 + \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1 - \alpha) x_{1C}^2 + \int_0^{x_{1C}} g(u) du +$$

$$+ 2K_d \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \int_0^{x_{1C}} \sqrt{u g(u)} du \quad (A2.11)$$

La valeur numérique maximale V_{\max} trouvée en utilisant l'algorithme de SIMPSON ci-dessus est égale à 0.0959.

Cette valeur maximale V_{\max} de $V(x)$ donne les régions de stabilité de la machine dans le plan (x_2, x_1) vérifiant l'équation suivante :

$$x_2 = \pm \sqrt{2} \sqrt{0.0958 - \left\{ \frac{1}{2} K_d^2 \alpha (1 - \alpha) x_1^2 + \int_0^{x_1} g(u) du + 2K_d \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \int_0^{x_1} \sqrt{u g(u)} du \right\} - \alpha K_d x_1} \quad (A2.12)$$

Ainsi, on peut étudier facilement la stabilité de machine autour du point de fonctionnement $\delta_0=0.4$ rad vis-à-vis des différentes perturbations. Les résultats obtenus sont satisfaisants en les comparant à ceux obtenus par la résolution numérique de l'équation différentielle de mouvement, qui est l'objet de l'annexe suivante.

**ANNEXE 3 :
RÉSOLUTION NUMÉRIQUE
DE L'ÉQUATION DE MOUVEMENT
DE LA MRV**

La présente annexe a pour objectif la présentation de l'algorithme utilisé pour résoudre numériquement l'équation différentielle non linéaire régissant le fonctionnement de la MRV. La méthode de RUNGE-KUTTA d'ordre 4 a été utilisée pour trouver les différentes caractéristiques de l'évolution temporelle de l'angle de charge suite à une quelconque perturbation.

A2.3 - RÉSOLUTION NUMÉRIQUE DE L'ÉQUATION DE MOUVEMENT DE LA MRV

L'équation de mouvement de la machine à réluctance variable dans un repère lié au rotor, en négligeant les pertes fer, les pertes mécaniques et l'effet de saturation, en sachant que tous les paramètres de la MRV sont exprimés dans le système de grandeurs réduites (p.u.), peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} + \frac{1}{P_j} (P_0 - P_\ell) = 0 \quad (\text{A3.1})$$

où en désigne par K_d le rapport $\frac{P_d}{P_j}$.

La puissance synchrone P_0 est exprimée comme suit :

$$P_0 = \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_s^2)} \left\{ (X_d X_q - R_s^2) \cdot \sin(2\delta) + R_s(X_d + X_q) \cdot \cos(2\delta) - R_s(X_d - X_q) \right\} \quad (\text{A3.2})$$

Il est évident que l'équation (A3.1) ne peut être intégrée à l'aide de fonctions élémentaires ou à l'aide des méthodes usuelles, c'est pourquoi on a recours à une méthode numérique de résolution.

On peut ramener cette équation du second ordre à un système de deux équations du premier ordre en effectuant le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \frac{d\delta}{dt} \end{cases} \quad (A3.3)$$

Ainsi, avec ce changement de variable adéquat, on trouvera directement $x_1 = \delta - \delta_0$ qui représentera les variations de l'angle de charge dans le temps, suite à une impulsion de perturbation, autour du point de fonctionnement stable en régime permanent δ_0 .

Par conséquent, l'expression (A3.1) peut s'écrire sous la forme du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} + K_d x_2 + g(x_1) = 0 \end{cases} \quad (A3.4)$$

avec :

$$g(x_1) = \left[\frac{1}{P_j} \frac{3E^2(X_d - X_q)}{2(X_d X_q + R_S^2)^2} \left\{ (X_d X_q - R_S^2) \cdot \sin 2(x_1 + \delta_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + R_S(X_d + X_q) \cdot \cos 2(x_1 + \delta_0) - R_S(X_d - X_q) \right\} - P_\ell \right] \quad (A3.5)$$

L'algorithme de résolution numérique utilisé est celui de RUNGE-KUTTA d'ordre 4, dont le principe est le suivant :

Soit l'équation différentielle du premier ordre :

$$y'(x) = f(x, y(x)) \quad x \in [a, b] \quad (A3.6)$$

où f est une fonction continue par rapport à chacune de ses variables. La valeur de la solution à l'abscisse a est connue, c'est la condition initiale : $y(a)=y_0$.

Les valeurs approchées de y sont données par :

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot \phi(x_n, y_n, h) \quad (\text{A3.7})$$

où ϕ est calculée, avec l'algorithme de RUNGE-KUTTA d'ordre 4, par :

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_n, y_n) \\ K_2 &= f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_1) \\ K_3 &= f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_2) \\ K_4 &= f(x_n + h, y_n + h K_3) \\ \phi(x_n, y_n, h) &= (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) / 6 \end{aligned} \quad (\text{A3.8})$$

Cette méthode démarre sans avoir besoin d'une estimation initiale. Le pas de calcul $h=(b-a)/N$ doit être choisi tel que les valeurs de K_2 et K_3 coïncident au moins à deux décimales près pour aboutir à des résultats satisfaisant d'une part, et avoir une méthode stable d'autre part.

Dans notre cas, il ne faut pas oublier qu'on a un système d'équations différentielles à résoudre et qu'on a besoin en réalité uniquement des variations de $x_1=\delta-\delta_0$ en fonction du temps. En d'autres termes on doit résoudre simultanément les équations du système (A3.4).

Les mêmes paramètres de la MRV que ceux de l'Annexe 2 ont été utilisés avec un pas de calcul $h=0.05$ et un nombre d'itérations $N=3500$. En fait, le coefficient d'amortissement K_d étant relativement faible, la pseudo-période est légèrement supérieure à 2π . Si l'on prend un pas de calcul $h=0.05$, on devra compter au moins $2\pi/0.05$, soit 126 itérations pour une pseudo-période.

Pour observer l'amortissement de la perturbation par la machine à réluctance variable sur une dizaine de pseudo-périodes, il faut donc procéder à $10 \cdot 126$, soit 1260 itérations. Par la suite, on s'est aperçu que pratiquement, cinq à six pseudo-périodes au maximum suffisent pour observer l'amortissement ($x_1=\delta-\delta_0 \simeq 2^\circ$), soit encore $6 \cdot 126=756$ itérations.

Annexe 3 : Résolution Numérique de l'Équation de Mouvement de la MRV

C'est pourquoi on a choisi un nombre d'itérations $N=600$, ce qui donne un temps d'observation de l'amortissement de $600 \cdot 0.05 = 30$ secondes.

Finalement, on aboutit à l'Algorithme de RUNGE-KUTTA d'ordre 4 représenté par la Fig. A3.1.

Pour Résoudre Simultanément :

$$dx_2/dt = -K_d x_2 - g(x_1) = f(x_1, x_2) \text{ et } dx_1/dt = x_2$$

avec : $0 \leq t \leq T$, $x_2(0) = 0$ et $x_1(0) = x_{10}$ à $(N+1)$ instants.

Entrées : le temps d'observation T , le nombre d'itérations N et l'amplitude de la perturbation x_{10} .

Sorties : les Solutions Approchées V_i et W_i respectivement de x_2 et x_1 aux différents instants t_i de 0 à T par pas de T/N .

Étape 1 : Mettre : $h = T/N$; $t = 0$ et $V = 0$ et $W = x_{10}$.
Sortir(t, V, W).

Étape 2 : Pour $I = 1, 2, \dots, N$ Faire les Étapes de 3 à 5.

Étape 3 : Mettre :

$$\begin{aligned} K_1 &= h \cdot x_2 & ; L_1 &= h \cdot f(x_1, x_2) \\ K_2 &= h \cdot (x_2 + L_1/2) & ; L_2 &= h \cdot f(x_1 + K_1/2, x_2 + L_1/2) \\ K_3 &= h \cdot (x_2 + L_2/2) & ; L_3 &= h \cdot f(x_1 + K_2/2, x_2 + L_2/2) \\ K_4 &= h \cdot (x_2 + L_3) & ; L_4 &= h \cdot f(x_1 + K_3, x_2 + L_3) \end{aligned}$$

Étape 4 : $V = V + (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4)/6$,
 $W = W + (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)/6$,
 $t = I \cdot h$.

Étape 5 : Sortir(t, V, W).

Étape 6 : STOP.

Fig. A3.1 Algorithme de RUNGE-KUTTA d'Ordre 4.

L'application de cet algorithme permet de résoudre aisément l'équation de mouvement de la machine à réluctance variable et par suite de représenter la courbe d'évolution dans le temps de l'angle de charge interne.

BIBLIOGRAPHIE

LES MACHINES À RÉLUCTANCE VARIABLE

- [ATHAY 79] T. ATHAY, R. PODMORE, S. VIRMANI, "A Practical Method for the Direct Analysis of transient Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No. 4, pp. 573-584, 1979.
- [BETZ 91] R. E. BETZ, T. J. E. MILLER, "Aspects of Control of Synchronous Reluctance Machines", Proc. of the 4th Euro-Conference on Power Electronics & Application, Vol. 1, Firenze-Italy, pp. 380-385, September 3-6, 1991.
- [BIEDINGER 90] J. M. BIEDINGER, "Machines Synchrones : Alimentation à Fréquence Constante", Université de Compiègne, Tome 1, 3-6 Septembre, 1991.
- [BRUNET 88] E. BRUNET, "Conception et Réalisation d'un Système Expert d'Aide à l'Interprétation des Chocs Mécaniques en Centrale Nucléaire", Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, Spécialité Contrôle des Systèmes, Compiègne, 21 Mars 1988.
- [CARTON 88] P. CARTON, "Acquisition et Reconnaissance de Messages Graphiques : un Système Expert dans un Système EAO", Thèse de Doctorat en Informatique de l'Université Paris VI, Paris, 8 Décembre 1988.
- [CHALMERS 72] B. J. CHALMERS, A. S. MULKI, "Design and Performance of Reluctance Motors with Unlaminated Rotors", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-91, No. 4, pp. 1562-1569, Jan./Feb. 1972.
- [CHALMERS 92] B. J. CHALMERS, "Saliency Effect in Permanent Magnet Motor Drives", Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 2, Kusadasi-Turkey, pp. 399-408, May 27-29, 1992.
- [CHAPPEL 84] P. H. CHAPPEL, W. F. RAY, R. J. BALAKE, "Microprocessor Control of a Variable Reluctance Motors", Proc. IEE, Vol. 131, Part B, No. 2, pp. 51-60, Mars 1984.
- [CHATELAIN 89] J. CHATELAIN, "Machines Électriques Tomes 1 & 2", Editions Dunod, Paris, 1989.

- [CHIBA 87] A. CHIBA, T. FUKAO, “*A Closed Loop for Super High Speed Reluctance Motor for Quick Torque Response*”, IEEE on Industry Applications Society, Annual Meeting, pp. 289-294, October 1987.
- [CHIBA 91] A. CHIBA, F. NAKAMURA, T. FUKAO, M. A. RAHMAN, “*Inductance of Cageless Reluctance Synchronous Machines having Nonsinusoidal Space Distribution*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, pp. 44-51, Jan./Fev. 1991.
- [CUNDEV 92] M. CUNDEV, L. PETKOVSKA, “*Dynamic Analysis of Optimal Control of the Switched Reluctance Motor*”, Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 1, Kusadasi-Turkey, pp. 67-72, May 27-29, 1992.
- [DAVIS 81] R. M. DAVIS, W. F. RAY, R. J. BALAKE, “*Inverter Drive for Switched Reluctance Motor : Circuits and Component Ratings*”, Proc. IEE, Vol. 118, Part B, No. 2, pp. 126-136, Mars 1981.
- [DELPIZZO 92] A. DELPIZZO, “*Saliency Effects in Permanent Magnet Motor Drives*”, Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 1, Kusadasi-Turkey, pp. 136-140, May 27-29, 1992.
- [DROUET 84] G. DROUET, “*Contribution à l'Étude des Machines à Réductance à Commutation Excitées par Courants Statoriques*”, Thèse de 3^{ème} Cycle, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2 Mars 1984.
- [EHSANI 92] M. EHSANI, “*Drive Technology Simplification*”, Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 1, Kusadasi-Turkey, pp. 524-541, May 27-29, 1992.
- [FAUCHER 81] J. FAUCHER, “*Contribution à l'Étude des Machines à Réductance Variable à Commutation Électronique*”, Thèse de 3^{ème} Cycle, Institut National de Polytechnique, Toulouse, Juin 1981.
- [FRANCESCHINI 91] G. FRANCESCHINI, S. PIRANI, M. RINALDI, C. TASSONI, “*Spice-Assisted Simulation of Controlled Electric Drives : An Application to Switched Reluctance Drives*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1103-1110, Nov./Dec. 1991.
- [GERRARD 71] J. GERRARD, J. A. PAUL, “*Rectilinear Screw-Thread Reluctance Motor*”, Proc. IEE, Vol. 118, No. 11, pp. 1575-1584, Nov. 1971.

- [GILLE 88] J. C. GILLE, P. DECAULNE, M. PÉLEGRIN, "*Systèmes Asservis Non Linéaires*", Editions Dunod, Paris, 1988.
- [GOMA 80] R. GOMA TATY, "*Étude d'un Moteur Linéaire à Réductance Variable et à Aimant Permanent*", Thèse de Docteur Ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Spécialité : Génie Électrique, Nancy, 13 Novembre 1980.
- [HARRIS 70] M. R. HARRIS, P. J. LAWRENSEN, J. M. STEPHENSON, "*Per-Unit Systems with Special Reference to Electrical Machines*", Cambridge University Press, London, 1970.
- [HILL 82] D. J. HILL, A. R. BERGEN, "*Stability Analysis of Multimachine Power Networks with Linear Frequency Dependent Loads*", IEEE Transactions on Circuits Systems, Vol. CAS-29, No. 12, pp. 840-848, 1982.
- [HOFT 68] R. G. HOFT, "*Liapunov Stability Analysis of Reluctance Motors*", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-87, No. 6, pp. 1485-1491, June 1968.
- [HONSINGER 71A] V. B. HONSINGER, "*The Inductances L_d and L_q of Reluctance Machines*", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-91, No. 1, pp. 298-304, Jan./Feb. 1971.
- [HONSINGER 71B] V. B. HONSINGER, "*Steady-State Performance of Reluctance Machines*", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-91, No. 1, pp. 305-311, Jan./Feb. 1971.
- [HONSINGER 72] V. B. HONSINGER, "*Stability of Reluctance Motors*", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-91, pp. 1536-1543, 1972.
- [JUFER 86] M. JUFER, "*Électro-Mécanique*", Editions Dunod, Paris, 1986.
- [JUFER 92] M. JUFER, "*Synchronous Motor Design*", Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 2, Kusadasi-Turkey, pp. 517-523, May 27-29, 1992.
- [KAKIMOTO 80] N. KAKIMOTO, Y. OHSAWA, M. HAYASHI, "*Transient Stability Analysis of Multimachine Power Systems with Field Flux Decays via LYAPUNOV's Direct Method*", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, pp. 1819-1827, 1980.

- [KAMINOSONO 68] H. KAMINOSONO, K. UYEDA, “*New Measurements of Synchronous Machine Quantities*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 11, pp. 1908-1918, November 1968.
- [KHANIJO 68] M. K. KHANIJO, A. K. MOHANTY, “*Stability of Reluctance Synchronous Motor*”, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-87, No. 12, pp. 2009-2015, Dec. 1968.
- [KULKARNI 92] A. B. KULKARNI, M. EHSANI, “*A Novel Position Sensor Elimination Technique for the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 1, pp. 144-150, Jan./Feb. 1992.
- [KRAUSE 68] P. C. KRAUSE, “*Methods of Stabilizing a Reluctance Synchronous Machine*”, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-87, No. 3, pp. 641-649, March 1968.
- [LAWRENSEN 64] P. J. LAWRENSEN, L. A. AGU, “*Theory and Performance of Polyphase Reluctance Machines*”, Proc. IEE, Vol. 111, No. 8, pp. 1435-1452, August 1964.
- [LAWRENSEN 67] P. J. LAWRENSEN, S. K. GUPTA, “*Developments in the Performance and Theory of Segmental-Rotor Reluctance Motors*”, Proc. IEE, Vol. 114, No. 5, pp. 645-653, May 1967.
- [LAWRENSEN 69A] P. J. LAWRENSEN, R. M. MATHUR, S. R. MURTHY VAMARAJU, “*Importance of Winding and Permeance Harmonics in the Prediction of Reluctance-Motor Performance*”, Proc. IEE, Vol. 116, No. 5, pp. 781-787, May 1969.
- [LAWRENSEN 69B] P. J. LAWRENSEN, J. M. STEPHENSON, “*Average Asynchronous Torque of Synchronous Machines with Particular Reference to Reluctance Machines*”, Proc. IEE, Vol. 116, No. 6, pp. 1049-1051, June 1969.
- [LAWRENSEN 71A] P. J. LAWRENSEN, S. R. BOWES, “*Stability of Reluctance Machines*”, Proc. IEE, Vol. 118, No. 2, pp. 356-369, Feb. 1971.
- [LAWRENSEN 71B] P. J. LAWRENSEN, R. M. MATHUR, J. M. STEPHENSON, “*Transient Performance of Reluctance Machines*”, Proc. IEE, Vol. 118, No. 6, pp. 777-783, June 1971.
- [LAWRENSEN 80] P. J. LAWRENSEN, J. M. STEPHENSON, P. T. BLENKINSOP, J. CORDA, N. N. FULTON, “*Variable-Speed Switched Reluctance Motors*”, Proc. IEE, Vol. 127, Part B, No. 4, pp. 253-265, July 1980.

- [LESENNE 81] J. LESENNE, F. NOTLET, G. SEGUIER, "Introduction à l'Électrotechnique Approfondie", Editions Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [LIPO 67] T. A. LIPO, P. C. KRAUSE, "Stability Analysis of Reluctance-Synchronous Machine", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-86, No. 7, pp. 825-834, July 1967.
- [LOCCI 92] N. LOCCI, I. MARONGIU, "A Linear Switched Reluctance Motor", Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 1, Kusadasi-Turkey, pp. 118-123, May 27-29, 1992.
- [MAILFERT 90] A. MAILFERT, "Machines à Réductance Variable", Les Techniques de l'Ingénieur, Vol. 9, pp. D550 : 1-20, 1990.
- [MATERU 89] P. N. MATERU, R. KRISHNAN, "Steady-State Analysis of the Variable-Speed Switched-Reluctance Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 36, No. 4, pp. 523-529, November 1989.
- [MATSUI 91] N. MATSUI, N. AKAO, T. WAKINO, "High Precision Torque Control of Reluctance Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1087-1097, Nov./Dec. 1991.
- [MEIBODY 86] F. MEIBODY TABAR, "Étude d'une Machine Synchrone à Réductance Variable pour des Applications à Grande Vitesse", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 13 Novembre 1986.
- [MIRA 90] C. MIRA, "Systèmes Asservis Non Linéaires", Editions Hermès, Paris, 1990.
- [MIYAGI 80] H. MIYAGI, T. TANIGUCHI, "Application of the LAGRANGE-CHARPIT Method to Analyse the Power System's Stability", International Journal of Control, Vol. 32, No. 2, pp. 371-379, 1980.
- [MIYAGI 86A] H. MIYAGI, A. R. BERGEN, "Stability Studies of Multimachine Power Systems with the Effects of Automatic Voltage Regulators", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 3, pp. 210-215, March 1986.
- [MIYAGI 86B] H. MIYAGI, K. YAMASHITA, "Stability Studies of Control Systems Using a Non-Luré Type LJAPUNOV Function", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 10, pp. 970-973, Oct. 1986.

- [MOALLEM 91] M. MOALLEM, C. M. ONG, "Predicting the Steady-State Performance of a Switched Reluctance Machine", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 144-150, Nov./Dec. 1991.
- [MOGHBELLI 91] H. MOGHBELLI, G. E. ADAMS, R. G. HOFT, "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 144-150, May/June 1991.
- [MULTON 85] B. MULTON, "Contribution à l'Optimisation des Ensembles Convertisseur-Machine à Réductance Variable : Minimisation du Facteur de Dimensionnement", Thèse de 3^{ème} Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2 Juillet 1985.
- [MULTON 92] B. MULTON, M. GABSI, "Influence de l'Entrefer sur les Performances et le Dimensionnement d'un Moteur à Réductance Variable à Double Saillance et de son Onduleur", 7^{ème} Colloque International sur les Moteurs Pas à Pas, "Actionneurs Électriques pour le Positionnement Incrémental et l'Entraînement à Vitesse Variable", Palais des Congrès, Nancy, 1-3 Juillet 1992.
- [MULTON 93] B. MULTON, "Principe et Éléments de Dimensionnement des Machines à Réductance Variable à Double Saillance Autopilotées", Journées Électrotechniques Club EEA, Belfort - FRANCE, 25-26 Mars 1993.
- [OMEKANDA 94] A. OMEKANDA, C. BROCHE, M. CRAPPE, R. BALAND, "Prediction of the Steady State Performance of the the Switched Reluctance Motor using Quadratic BIEM-FEM Field Solutions in the Linear Model", ICEM '94, Paris - France, Vol. 1, pp. 59-64, September 5-8 1994.
- [OMETTO 94] A. OMETTO, A. JULIAN, T. A. LIPO, "A Novel Low Cost Variable Reluctance Motor Drive", ICEM '94, Paris - France, Vol. 1, pp. 77-79, September 5-8 1994.
- [ONG 75] C. M. ONG, T. A. LIPO, "Stability Behaviour of a Synchronous-Reluctance Machine Supplied from a Current Source Inverter", IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 484-493, Sept. 28 - Oct. 2, 1975.
- [PAI 70] M. A. PAI, M. ANANDA MOHAN, J. GOPALA RAO, "Power System Transient Stability Regions using POPOV's Method", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-89, pp. 788-794, 1970.

- [PATTISON 88] L. PATTISON, M. BAKER, A. E. DAWSON, A. R. EASTHAM, "*Integrated Nonlinear Modelling of Switched Reluctance Drives*", Proc. the 2nd International Symposium on Modelling & Simulation of Electrical Machines & Power systems, pp. 177-184, Quebec, Canada, 24-25 August, 1985.
- [PAUL 85A] R. J. PAUL, P. J. FLEMEING, A. M. ELSAMAHY, "*Frequency-Response Identification of a Linear Helical Reluctance Motor*", Proc. IEE, Vol. 132, Part B., No. 2, pp. 107-111, March 1985.
- [PAUL 85A] R. J. PAUL, P. J. FLEMEING, A. M. ELSAMAHY, "*Adaptative Microprocessor Control of a Linear Helical Reluctance Motor*", Proc. IEE, Vol. 132, Part B., No. 2, pp. 101-105, March 1985.
- [PHILIPS 92] D. A. PHILIPS, L. R. DUPRE, "*A Method for Calculating Switched Reluctance Motor Core Losses*", Proc. of the International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, Vol. 1, Kusadasi-Turkey, pp. 124-129, May 27-29, 1992.
- [RADUN 92] A. V. RADUN, "*High-Power Density Switched Reluctance Motor Drive for Aerospace Applications*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 1, pp. 113-119, Jan./Fev. 1992.
- [RIOUX 81] C. RIOUX, "*Étude Théorique Simplifiée des Propriétés Physiques des Machines à Réductance Variable Mono et Poly-Entrefers*", Journée GRECO, No. 22, Paris, 30 Juin 19981.
- [SARGOS 81] F. M. SARGOS, "*Étude théorique des Performances des Machines à Réductance Variable*", Thèse de Docteur ès Sciences, Institut National Polytechnique de Lorraine ENSEM, Nancy, 27 Mars 1981.
- [SCHOORENS 82] H. SCHOORENS, "*Contribution à l'Étude Analytique Approchée des Machines à Réductance Variable, Notamment de celles à Configuration Axisymétrique : Applications aux Actionneurs Linéaires*", Thèse d'État, Université des Sciences et Technologies de Lille I, Lille, Octobre 1982.
- [STEPHENS 91] C. M. STEPHENS, "*Fault Detection and Management System for Fault-Tolerant Switched Reluctance Motor Drives*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1098-1102, Nov./Dec. 1991.
- [STEPHENSON 89] J. M. STEPHENSON, M. M. EL-KHAZENDAR, "*Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors*", Proc. IEE, Vol. 136, Part B, No. 1, pp. 50-58, January 1989.

- [TAMURA 89] J. TAMURA, T. SASAKI, S. ISHIKAWA, J. HASEGAWA, "Analysis of the Steady State Characteristic of Doubly Fed Synchronous Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, pp. 250-256, June 1989.
- [TOUNZI 93] A. TOUNZI, "Contribution à la Commande Vectorielle des Machines à Réductance Variable : Prise en Compte de l'Amortissement et de la Saturation", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Février 1993.
- [UEZATO 83] K. UEZATO, M. UEDA, "Effects of Parameter Changes on the Performance of Solid Rotor Three-Phase Reluctance Motors", Electric Machines & Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 185-197, 1983.
- [UEZATO 86] K. UEZATO, H. MIYAGI, M. UEDA, "Transient Stability Analysis of Three-Phase Reluctance Motors", Electric Machines & Power Systems, Vol. 11, pp. 411-420, 1986.
- [VAS 86] P. VAS, J. W. FINCH, J. E. BROWN, "Simplified Stability Analysis of Reluctance Machines Based on Space-Vector Concepts", Proc. ICEM'86, Part 1, No. 2, München-Germany, pp. 85-88, September 8-10, 1986.
- [VIVES 94] R. VIVES FOS, S. CHEKOU, S. ALLANO, "A Comparative Study of High Speed Electrical Machines : Design of a New Reluctance Motor", ICEM '94, Paris - France, Vol. 1, pp. 65-70, September 5-8 1994.
- [VUKOSAVIC 91] S. VUKOSAVIC, V. R. STEFANOVIC, "SRM Inverter Topologies : A Comparative Evaluation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1034-1047, Nov./Dec. 1991.
- [WASTON 74] W. WASTON, G. MANCHUR, "Synchronous Machine Operational Impedances from Low Voltage Measurements at the Stator Terminals", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-93, pp. 777-784, 1974.
- [WELLER 91] A. WELLER, P. TRAWINSKI, "Design and Control of Low Power Switched Reluctance Motors (<1kW)", Proc. of the 4th Euro-Conference on Power Electronics & Application, Vol. 1, Firenze-Italy, pp. 380-385, September 3-6, 1991.
- [WILLEMS 69] J. L. WILLEMS, "The Computation of Finite Stability Regions by means of Open LJAPUNOV Surfaces", International Journal of Control, Vol. 10, No. 5, pp. 537-544, 1969.

- [WILLEMS 70] J. L. WILLEMS, J. C. WILLEMS, "*The Application of Lyapunov Methods to the Computation of Transient Stability Regions for Multimachine Power Systems*", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-89, pp. 795-801, 1970.
- [XU 91] L. XU, X. XU, A. LIPO, D. W. NOVOTNY, "*Vector Control of a Synchronous Reluctance Motor Including Saturation and Iron Loss*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 977-985, Sep./Oct. 1991.
- [ZELAYA 91] H. ZELAYA, C. ELMAS, "*Computer Analysis of Drive Systems for Switched Reluctance Motor*", Proc. of the 4th Euro-Conference on Power Electronics & Application, Vol. 1, Firenze-Italy, pp. 380-385, September 3-6, 1991.
- [ZHOU 87] J. ZHOU, "*Étude de l'Optimisation de la Machine à Réductance Variable*", Thèse 3^{ème} Cycle, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1987.
- [ZOUAIDI 94A] A. ZOUAIDI, H. SCHOORENS, "*An Expert System for Performances Evaluation and Transient Stability Analysis of Reluctance Machines by Means of Parameters and Hypotheses: Application to Computer-Aided-Education*", Modern Electrical Drives, NATO Advanced Study Institute, Antalya - Turkey, pp. 166-171, 31st Jan. - 11th Fev. 1994.
- [ZOUAIDI 94B] A. ZOUAIDI, H. SCHOORENS, "*An Expert System for Performances Evaluation and Transient Stability Analysis of Reluctance Machines Based on Parameters Values and Hypotheses: Application to Computer-Aided-Education*", pp. 278-281, ICEM '94, Paris-France, September 5-8, 1994.

LES SYSTÈMES EXPERTS

- [ADELI 86] H. ADELI, "*Expert Systems in Construction and Structural Engineering*", Editions Chapman & Hall, London, 1986.
- [ADELI 88] H. ADELI, M. M. AL-RIJLEH, "*A Knowledge Based Expert System for Design of Roof Trusses*", *Microcomputer in Civil Engineering*, Vol. 2, No. 3, September 1987.
- [AHRENS 91] S. AHRENS, I. KORTABERRIA, J. BIGEON, D. POUPART, "*Expert System for Designing Converters for Large Synchronous Machines*", Proc. of the 4th Euro-Conference on Power Electronics & Application (EPE), Vol. 2, Firenze-Italy, pp. 266-271, September 3-6, 1991.
- [AQUESBI 83] A. AQUESBI, J. C. BOUQUET, J. M. FOUET, S. TICHKIEWITCH, M. REYNIER, P. TRAN, "*An Expert System for Computer Aided Mechanical Design*", Editions Masson, Information Pressing 83, R. E. A., 1983.
- [AYEL 88] M. AYEL, M. CHIEN, E. PIPARD, M. C. ROUSSET, "*De la Cohérence dans les Bases de Connaissances*", Actes des Journées Nationales, Intelligence Artificielle, PRC-GRECO, Toulouse, 14-15 Mars 1988.
- [BERNOLD 86] A. BERNOLD, G. ALBERS, "*Artificial Intelligence : Towards Practical Application*", Editions Elsevier Science Publishers, Netherlands, 1986.
- [BOY 88] G. BOY, B. FALLER, J. SALLANTIN, "*Acquisition et Ratification des Connaissances*", Actes des Journées Nationales, Intelligence Artificielle, PRC-GRECO, Toulouse-France, 14-15 Mars 1988.
- [BRAMER 86] M. A. BRAMER, "*Research and Development in Expert Systems III*", Editions Cambridge University Press, London, 1986.
- [BRASSARD 89] S. BRASSARD, "*Méthodologie et Modélisation Floue des Connaissances dans l'Activité de Conception en Électrotechnique : Application à la Réalisation d'un Système Expert d'Aide à la Conception de l'Appareillage Électrique*", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 22 Septembre 1989.

- [BRIAND 88] R. BRIAND, "Méthode de Développement de Systèmes Experts", Editions Eyrolles, Paris, 1988.
- [CARTON 88] P. CARTON, "Acquisition et Reconnaissance de Messages Graphiques, Un Système Expert dans un Système EAO", Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, Paris, 8 Décembre 1988.
- [CHANG 93] S. H. CHANG, M. S. LIN, H. F. SUN, J. L. CHEN, "Object-Oriented Expert Systems for Fault Diagnosis", Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 5, pp. 102-107, Le Touquet -France, October 17-20, 1993.
- [CHEHAYEB 89] F. S. CHEHAYEB, J. J. CONNOR, J. M. NIEDSWECKI, "Innovative Engineering Design", Micro-Computers in Civil Engineering, Vol. 4, No. 1, March 1989.
- [CLEMENT 91] M. CLEMENT, "Un Système Expert pour la Maintenance des Réseaux Électriques", Revue Générale de l'Électricité (RGE), No. 1, Janvier 1991.
- [CONDILLAC 86] M. CONDILLAC, "PROLOG Fondements et Applications", Editions Dunod, Paris, 1986.
- [CORREIA 93] A. D. CORREIA, A. SANTOS, "Optimal Rule-Based System for Production and Energy Management", Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 4, pp. 731-736, Le Touquet -France, October 17-20, 1993.
- [DAS 87] B. K. DAS, R. A. BERG, "Impact Assesement : A Case Study for Scheduling NASA's Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) Resources", Proc. Third Annual Expert Systems in Government Conference, Washington, pp. 254-259, October 19-23 1987.
- [DELAHAYE 88] J. P. DELAHAYE, "Cours de PROLOG avec TURBO-PROLOG : Éléments Fondamentaux", Editions Eyrolles, Paris, 1988.
- [DIZIER 87] P. SAINT-DIZIER, "Initiation à la Programmation en PROLOG", Editions Eyrolles, Paris, 1987.
- [FARGEAS 88] X. FARGEAS, F. FRYDMAN, "Les Systèmes Experts en Médecine", Editions Hermès, Paris, 1988.
- [FARRENY 85] H. FARRENY, "Les Systèmes Experts : Principes et Exemples", Editions Cepadues, Paris, 1985.
- [FARRENY 87] H. FARRENY, M. GHALLAB, "Éléments d'Intelligence Artificielle", Editions Hermès, Paris, 1987.

- [FILIPPETTI 94] F. FILIPPITI, M. MARTELLI, "*NExpert Object Based Design Environment of the Power Transformers*", ICEM '94, Paris - France, Vol. 3, pp. 747-752, September 5-8, 1994.
- [FUKUI 86] C. FUKUI, J. KAWAKAMI, "*An Expert Systems for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, pp. 83-90, October 1986.
- [GALLO 85] P. GALLO, R. M. ROLANDINO, F. CANEPA, F. BORRAZO, "*A Knowledge Based Approach to Business Planning*", Proc. of the 2nd Mini Euro-Conference, Lunteren-Netherlands, November 17-20, 1985.
- [GALLOUIN 88] J. F. GALLOUIN, "*Transfert de Connaissances des Systèmes Experts : Techniques et Méthodes*", Editions Eyrolles, Paris, 1988.
- [GEOFFREY 88] G. R. GEOFFREY, "*Expert Systems in Teaching of Structural Mechanics*", Architectural Science Review, Vol. 31, June 1988.
- [GHALLAB 88] M. GHALLAB, "*Compilation des Bases de Connaissances*", Actes des Journées Nationales Intelligence Artificielle, PRC-GRECO, Toulouse, 14-15 Mars 1988.
- [HARMON 88A] P. HARMON, R. MAUS, W. MORRISSEY, "*Expert Systems : Tools and Applications*", Editions John Wiley & Sons, 1988.
- [HARMON 88B] P. HARMON, D KING, "*Systèmes Experts Professionnels : Conception et Implantation*", Editions Masson, Paris, 1988.
- [HART 88] A. HART, "*Acquisition du Savoir pour les systèmes Experts*", Editions Masson, Paris, 1988.
- [KANDT 87] K. KANDT, "*A Tool to Support Competitive Argumentation*", Journal of Management Information System/Spring, Vol. 3, No. 4, pp. 54-64, 1987.
- [KARLA 87] P. K. KARLA, R. M. MATHUR, "*Investigations for Developing Expert Systems for Power System Control*", Electric Machines & Power Systems, Vol. 13, pp. 265-274, 1987.
- [KAUFMANN 87] A. KAUFMANN, "*Nouvelles Logiques pour l'Intelligence Artificielle*", Editions Hermès, Paris, 1987.

- [KAYSER 88] D. KAYSER, "*Le Raisonnement à Profondeur Variable*", Actes des Journées Nationales, Intelligence Artificielle, PRC-GRECO, Toulouse, 14-15 Mars 1988.
- [KAZIMIERCZAK 85] J. KAZIMIERCZAK, "*Knowledge Acquisition from User Programs by Computer with Own Knowledge-Based System*", Proc. of the 2nd Mini Euro-Conference, Lunteren-Netherlands, November 17-20, 1985.
- [KELLER 87] R. KELLER, "*Expert System Technology : Development and Application*", Editions Yourdon Press, London, 1987.
- [KERAVNOU 86] E. T. KERAVNOU, L. JOHNSON, "*Competent Expert Systems*", Editions Kogan-Page, 1986.
- [KIDD 87] A. L. KIDD, "*Knowledge Acquisition for Expert Systems*", Editions Plenum Press, New York , 1987.
- [LALANNE 87] B. LALANNE, "*Système Expert d'Aide à l'Analyse du Comportement Mécanique des Systèmes*", Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Université de Valenciennes, Spécialité Automatique Industrielle et Humaine, Valenciennes, 26 Juin 1987.
- [LAURIÈRE 88] J. L. LAURIÈRE, "*Intelligence Artificielle Tome 2: Représentation des Connaissances*", Editions Eyrolles, Paris, 1988.
- [LEVINE 85] P. LEVINE, J. C. MAILLARD, J. C. POMEROL, "*DECIDEX, a Multi-Expert System for Strategic Decisions*", Proc. of the 2nd Mini Euro-Conference, Lunteren-Netherlands, November 17-20, 1985.
- [LEVINE 89] P. LEVINE, J. C. POMEROL, "*Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision et Systèmes Experts*", Editions Hermès, Paris, 1989.
- [LIU 86] C. C. LIU, K. TOMSOVIC, "*An Expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-1, No. 3, pp. 195-201, Aug. 1986.
- [MENEXIADIS 88] D. MENEXIADIS, "*Conception d'un Système Expert d'Aide au Diagnostic pour les Machines Tournantes*", Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes, Spécialité Automatique, Valenciennes, 10 Novembre 1988.

- [NARUO 90] N. NARUO, M. LEHTO, G. SALVENDY, "Development of a Knowledge-Based Decision Support System for Diagnosing Malfunctions of Advanced Production Equipment", *International Journal of Prod. Res.*, Vol. 28, No. 12, pp. 2259-2276, 1990.
- [NICOLAS 88] J. NICOLAS, "Généralisation en Logique des Prédicats", Actes des Journées Nationales, Intelligence Artificielle, PRC-GRECO, Toulouse, 14-15 Mars 1988.
- [PINSON 81] S. PINSON, "Représentation des Connaissances dans les Systèmes Experts", *RAIRO Informatique and Computer Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 343-347, 1981.
- [PUTTGEN 88] B. PUTTGEN, J. F. JANSEN, "An Expert System for the Design of a Power Plant Electrical Auxiliary System", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 254-261, February 1986.
- [ROTH 83] F. H. ROTH, D. A. WATERMAN, D. B. LEMAT, "Building Expert Systems", Editions Addison-Wesley, U.S.A., 1983.
- [QUINLAN 91] J. R. QUINLAN, "Knowledge Acquisition for Structured Data : Using Determinate Literals to Assist Search", *IEEE Expert*, pp. 32-37, December 1991.
- [SCHULTE 87] R. P. SCHULTE, S. L. LARSEN, G. B. SHEBLE, J. N. WRUBEL, B. F. WOLLENBERG, "Artificial Intelligence Solutions to Power System Operating Problems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 4, pp. 920-926, November 1987.
- [TRICHON 90] F. TRICHON, J. BIGEON, M. ELMALDI, J. IZAGIRRE, "DAMOCLES : Un Système Expert de Conception en Électrotechnique Appliqué au Moteur Asynchrone", 10^{ème} Journées Internationales : Les Systèmes Experts et Leurs Applications, Avignon-France, pp. 315-327, 1990.
- [WATERMAN 86] D. A. WATERMAN, "A Guide to Expert Systems", Editions Addison-Wesley, U.S.A., 1986.
- [WINSTON 88] P. H. WINSTON, "Intelligence Artificielle", Editions InterEditions, Paris, 1988.
- [WOLLENBERG 87] B. F. WOLLENBERG, T. SAKAGUCHI, "Artificial Intelligence in Power System Operations", *Proc. IEE*, Vol. 75, No. 12, pp. 1678-1685, December 1987.

- [ZHANG 89] Z. Z. ZHANG, G. S. HOPE, O. P. MALIK, “*Expert Systems in Electric Power Systems : A Bibliographical Survey*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1355-1361, October 1989.
- [ZHAO 88] F. ZHAO, M. L. MAHER, “*Using Analogical Reasoning to Design Buildings*”, Engineering with Computer, Vol. 4, 1988.
- [ZOUAIDI 93A] A. ZOUAIDI, H. SCHOORENS, “*An Expert System for Performances Evaluation of Reluctance Machines using Hypotheses and Machine's Parameters*”, Multimedia and Computer Tools : The Future for Engineering, 4th Annual Conference of the EAEEIE, Prague, pp. 180-184, September 8-10, 1993.
- [ZOUAIDI 93B] A. ZOUAIDI, H. SCHOORENS, “*An Expert System for Performances Evaluation and Analysis of Reluctance Machines by Means of Parameters and Hypotheses*”, EXPERSYS-93 Expert System Applications & Artificial Intelligence, Paris, pp. 147-152, December 6, 7, 1993.

RÉSUMÉ :

L'objectif de ce travail a été la conception et la réalisation d'un système expert, baptisé SEMAREV, pour évaluer les performances et prédire la stabilité des machines à réluctance variable (MRV) en régime permanent. L'approche système expert est rendue indispensable du fait de la diversité et la nature déclarative des connaissances outre l'aspect heuristique de certaines informations. Le raisonnement de ce système expert est basé sur un modèle ne nécessitant que la connaissance des paramètres électriques de la machine et des hypothèses postulées par l'utilisateur.

Dans le premier chapitre on a présenté l'état de l'art en matière de systèmes experts appliqués aux différents domaines de l'ingénierie électrique. La première partie du deuxième chapitre a été consacrée à la modélisation et à l'étude des performances intrinsèques des MRV en régime stationnaire. Dans la seconde partie le problème de stabilité des MRV et la méthode permettant de l'analyser ont été exposés. La procédure d'implémentation et de mise en œuvre du système expert, à l'aide du langage PROLOG, a été décrite au troisième chapitre. L'évaluation et la validation du système expert, par comparaison de ses résultats avec ceux issus des essais expérimentaux ou bibliographiques, ont été présentées au dernier chapitre.

MOTS-CLÉS :

Intelligence Artificielle, Système Expert, Machine à Réluctance Variable , Étude de Stabilité - Méthode Directe de LJAPUNOV.

☆☆☆☆

ABSTRACT :

This study is aimed to design and to develop an expert system, named SEMAREV, in order to evaluate all steady-state reluctance machines performances and to predict their stability regions. The expert system approach is justified because the declarative nature, the diversity and the heuristic aspect of knowledge. The expert system reasoning is only based on a d-q model parameters and user made hypotheses.

In the first chapter, a bibliographical survey on expert systems used in Electrical Engineering is exposed. A reluctance machine model for performances evaluation and transient stability analysis is proposed in chapter two. The implementation of this expert system using PROLOG is described in chapter three. In the last chapter, the evaluation and validation of the expert system are presented by means of comparison of its results to experimental or bibliographical ones.

KEYWORDS :

Artificial Intelligence, Expert System, Reluctance Machine, Transient Stability Study - LJAPUNOV Direct Method.

