

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MENTOURI de CONSTANTINE

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Electrotechnique

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

*Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister
en Electrotechnique*

Option : Commande et modélisation des machines électriques.

Par

FEYROUZ MESSAI

*Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance
Variable.*

Soutenu le : .../.../ 2009

Devant le jury:

Président : Aissa Bouzid

Prof. à l'Université de Constantine

Rapporteur : Dr. Ammar Bentounsi

M.C. à l'Université de Constantine

Examineur 1 : Hocine Benalla

Prof. à l'Université de Constantine

Examineur 2 : Abdelwahab Zaatri

Prof. à l'Université de Constantine

Dédicace

Je dédierai ce mémoire

A mon mari M. Messaoud

F. Messai

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Je remercie ensuite ma chère mère Naima, ma grand-mère Zineb, mes parents, mes sœurs, mes frères et surtout Amira, Salima, Samia, Leila pour leurs encouragements.

Je remercie également mon encadreur, le Dr. Ammar Bentounsi, pour le sujet qu'il m'a proposé, ses conseils et sa disponibilité. Je le remercie aussi pour ses encouragements, sa gentillesse et sa sympathie tout au long de l'année de travail.

Je remercie M^{elle} H.Djeghloud sans laquelle je n'aurai pas pu finaliser la rédaction et la simulation.

Je remercierai bien sur les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail, à savoir le Prof. A. Bouzid, président du jury, les Prof. H. Benalla et A. Zaatri qui n'ont pas hésité à accepter l'invitation d'être membres de jury.

Je terminerai par remercier toutes mes amies, notamment Radia, Wassila, Dalila, Feyrouz, Sihem et Rima, ainsi que tous les enseignants du Dept. D'électrotechnique !

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 INTRODUCTION	3
I.2 HISTORIQUE DE L'EOLIEN	4
I.3 L'ENERGIE EOLIENNE	6
I.4 STRUCTURE DES EOLIENNES	8
I.4.1 Structure de conversion avec et sans multiplicateur.....	8
I.4.2 Descriptif d'une éolienne	9
I.4.3 Les éoliennes à vitesse fixe	11
I.4.4 Les éoliennes à vitesse variable	13
I.5 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	15
I.5.1 Hypothèses simplificatrices	15
I.5.2 Modèle de la turbine	17
I.5.3 Modèle du multiplicateur de vitesse	18
I.6. TYPES DE GENERATEURS ELECTRIQUES EOLIENS	18
I.7 CONCLUSION	19

Chapitre II : LES MACHINES A RELUCTANCE VARIABLE

II.1. INTRODUCTION.....	20
II.2. PRINCIPE DE BASE.....	21
II.3. DOMAINES D'UTILISATION DES MRV.....	24
II.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MRV.....	24
II.5. DIFFERENTS TYPES DE MRV	25
II.5.1 MRV lentes pour applications éoliennes.....	25
A. MRV « Pures »	25
B. MRV Vernier.....	26
C. MRV hybrides.....	27

D. MRV à flux axial.....	28
II.5.2. Machines à stator lisse.....	29
II.5.3. Machines à double denture.....	29
II.6. CARACTERISTIQUES ELECTROMAGNETIQUES – ENERGIE - COUPLE.....	30
II.7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D’UNE GRV.....	32
II.8. MODES D’EXCITATION DE LA GRV.....	33
II.9. L’ALIMENTATION DE LA GRV.....	34
II.9.1. Convertisseur de puissance	34
II.9.2. Paramètres de commande en mode générateur	36
II.10. CONCLUSION	38

***Chapitre III : MODELISATION & SIMULATION DU SYSTEME GRV-CONVERTISSEUR
AVEC APPLICATION A L’EOLIEN***

III.1. INTRODUCTION	39
III.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	40
III.3. ÉLÉMENTS DU SYSTEME	41
III.3.1. Modèle non-linéaire de la GRV	41
a) Equations électromagnétiques.....	42
b) Calcul de l’inductance.....	44
c) Production de couple.....	45
III.3.2. Convertisseur de la GRV.....	46
III.4. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA GRV	47
III.4.1 Objectif	47
III.4.2 Schéma synoptique	48
III.5 STRATEGIE DE LA COMMANDE PAR HYSTERESIS.....	48
III.6. SIMULATION D’UNE GRV6/4.....	49
III.6.1 Paramètres utilisés pour la simulation.....	49
III.6.2 Description du modèle élaboré sous Matlab/Simulink	50
III.6.2.1 Bloc GRV	50
III.6.2.2 Bloc Convertisseur de puissance	53

<i>III.6.2.3 Bloc Bus Continu</i>	54
<i>III.6.2.4 Contrôleur</i>	55
<i>III.6.2.5 Capteur de position</i>	55
III.6.3 Résultats de simulation de la GRV	56
III.7 ASSOCIATION DE LA GRV A UNE TURBINE EOLIENNE	67
III.7.1 Description générale de l'ensemble GRV-Turbine éolienne	67
III.7.2 Modèle de simulation	68
III.7.3 Résultats de simulation	69
<i>III.7.3.1 Turbine à vitesse fixe</i>	69
<i>III.7.3.2 Turbine à vitesse variable</i>	71
III.8 CONCLUSION	73
CONCLUSION GENERALE	74



Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le principe de la machine à réluctance variable (MRV) est en réalité très ancien car il remonte aux inventions du 19^{ème} siècle où on l'appelait "moteur électromagnétique". Le moteur à réluctance variable est un moteur fondamentalement pas à pas et a eu beaucoup d'applications, notamment dans l'horlogerie. L'idée d'utiliser la configuration MRV dans un mode continu (à la différence du mode pas à pas) avec commande par semi-conducteur de puissance a été introduite par Nasar, French, Koch et Lawrenson dans les années 1960. A cette époque, seulement le semi-conducteur type thyristor de puissance était disponible pour la commande des MRV. Mais ces dernières années, les transistors de puissance, GTO, IGBT, et MOSFET ont été développés dans les gammes de puissance exigées par les MRV.

L'atout de la configuration MRV est sa robustesse due à l'absence de système collecteur. S'agissant de la structure à double saillance qui nous intéresse ici (MRVDS), le stator est constitué d'un empilage de tôles magnétiques formant des pôles saillants autour desquels sont disposées des bobines compactes et indépendantes. Par contre, le rotor, lui aussi à pôles saillants, est dépourvu de bobinage. Outre donc sa robustesse et sa simplicité donc son faible coût de fabrication, la MRVDS possède des performances assez attrayantes pour pouvoir concurrencer bientôt les machines conventionnelles. Elles connaissent déjà de multiples applications dans :

- ✓ L'industrie : compresseurs, ventilateurs, pompes, ...
- ✓ L'électroménager : robots, machines à laver, aspirateurs, ...
- ✓ La traction électrique et l'aéronautique
- ✓ Les énergies renouvelables, notamment les éoliennes dont il sera question ici.

La MRV a surtout été étudiée en fonctionnement moteur, plus rarement en mode générateur. Ce qui justifie un peu le choix de ce thème. Il s'agira ici d'élaborer un modèle de la machine à réluctance variable associée à un convertisseur dont la commande lui permettra de fonctionner correctement en mode générateur puis de simuler l'ensemble sous environnement *MATLAB/SIMULINK*. Nous terminerons notre étude par une application éolienne vu l'essor que connaît actuellement cette filière des énergies renouvelables dans un contexte de crise énergétique mondiale.

En conséquence, notre mémoire sera organisé comme suit :

- au *Chapitre I* : nous donnerons un aperçu de l'évolution des systèmes de conversion électromécanique d'énergie associés aux éoliennes.
- au *Chapitre II* : après une brève présentation des différentes topologies de MRV, nous axerons ce chapitre sur l'étude théorique d'une MRV 6/4 à double saillance, notamment les conditions de fonctionnement en modes *moteur* et surtout *générateur*.
- dans le dernier *Chapitre* : nous élaborerons les différents blocs relatifs au modèle de la GRV associée à son convertisseur et sa commande puis nous effectuerons différentes simulations de l'ensemble sous *MATLAB/SIMULIN*, en régime *non-linéaire* .

Pour finaliser ce *Chapitre III*, nous avons associé le couple GRV-convertisseur à une turbine éolienne puis analysé les performances de ce système aérogénérateur sous différentes conditions.

Nous concluons notre étude par une synthèse des résultats les plus significatifs obtenus et des perspectives pour améliorer et faire évoluer ce modeste travail !

Chapitre I

Conversion

De L'énergie Eolienne

I.1 INTRODUCTION

Pour des raisons « environnementales » les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, une éolienne devrait comporter :

- ▶ un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles et de la nacelle, multiplicateur de vitesse, ...).
- ▶ un système qui permet de la contrôler électriquement (générateur électrique piloté par une électronique de commande et de puissance).

Dans un premier temps, les différentes parties constituant une éolienne sont décrites d'une façon générale. Puis, un comparatif sera établi entre les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable [1].

Nous donnerons aussi un aperçu des différentes configurations de générateurs associés.

I.2 HISTORIQUE DE L'EOLIEN

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C. environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^{ème} siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [2]

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique etc..

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant la 1^{ère} et la 2^{ème} guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2^{ème} guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes [3, 4].

Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux EU mais augmentèrent en Europe, ce qui permit un développement important de cette industrie

dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001.

L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40 % ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde.

Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90.

Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040 [3, 4, 5].

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et est par conséquent différent d'un pays à l'autre, et même d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus d'importance (la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent). Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années [4].

Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines toujours plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif [6].

I.3 L'ENERGIE EOLIENNE

I.3.1 LOI DE BETZ

Etudions l'éolienne présentée sur la figure (I.1), d'après la théorie de Betz [7], la puissance du vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (I-1)$$

Avec :

$S_{éolienne}$: La surface balayée par l'éolienne,

ρ : La masse volumique de l'air (1.225 kg/m³) et v la vitesse du vent.

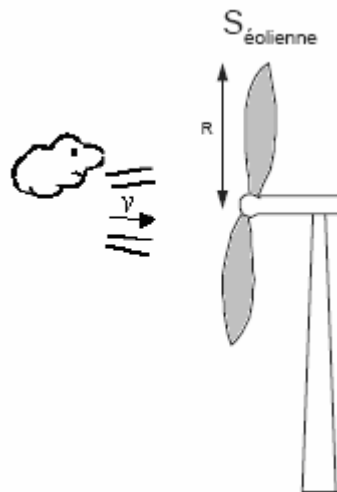


Fig.I.1. Eolienne simplifier.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p \cdot P_{vent} \quad (I-2)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27. Le coefficient C_p , différent pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{v} \tag{I-3}$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent. Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique suivante [8]:

$$C_p(\lambda_i, \beta_i) = (0.44 - 0.0167.\beta_i).\sin(\pi.\frac{\lambda - 3}{15 - 0.3.\beta_i}) - 0.00184.(\lambda - 3).\beta_i \tag{I-4}$$

Avec β_i exprimé en degrés.

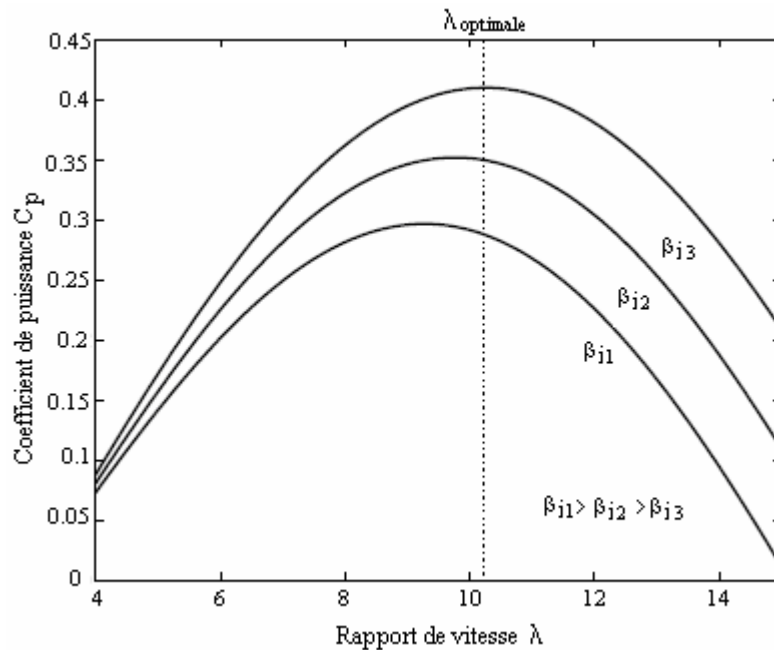


Fig.I.2 Coefficient de puissance C_p

La figure (I.2) représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (I.4), en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale [9]. La figure (I.2) montre le $\lambda_{optimal}$ correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (I-3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en oeuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [10].

I.4 STRUCTURE DES EOLIENNES

I.4.1 STRUCTURE DE CONVERSION AVEC ET SANS MULTIPLICATEUR

La vitesse d'une turbine éolienne est relativement lente. Une première technologie d'éoliennes repose sur des machines tournantes synchrones (plutôt à rotor bobiné pour les éoliennes connectées en moyenne tension) de petite vitesse, comportant donc un grand nombre de pôles [11], et par suite ayant un grand diamètre. Les éoliennes basées sur des machines à réluctance variable s'inscrivent également sous cette catégorie de génératrices [12]. Ces génératrices rendent impossible une connexion directe au réseau de distribution fonctionnant à 50 Hz. Elles sont nécessairement alimentées par un ensemble constitué de deux convertisseurs de puissance : l'un fonctionnant sous fréquence variable et permettant le fonctionnement à vitesse variable et l'autre fonctionnant à 50Hz et permettant une connexion sur le réseau. Cependant, cette technologie de machine a actuellement une puissance inférieure au mégawatt.

Une seconde technologie repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone. D'une manière générale, cette dernière tourne à une vitesse beaucoup plus importante que la turbine éolienne. Il est alors nécessaire d'adapter celle-ci à la vitesse de la turbine en intercalant un multiplicateur mécanique [13]. Ces multiplicateurs mécaniques ont l'inconvénient de nécessiter une maintenance accrue et de nuire à la fiabilité de l'éolienne. Cependant pour la génération de forte puissance, c'est la technologie qui est retenue par les constructeurs pour une connexion sur un réseau de moyenne tension.

Nous présentons dans le paragraphe suivant les éléments constituant une telle éolienne.

I.4.2 DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (I.3).

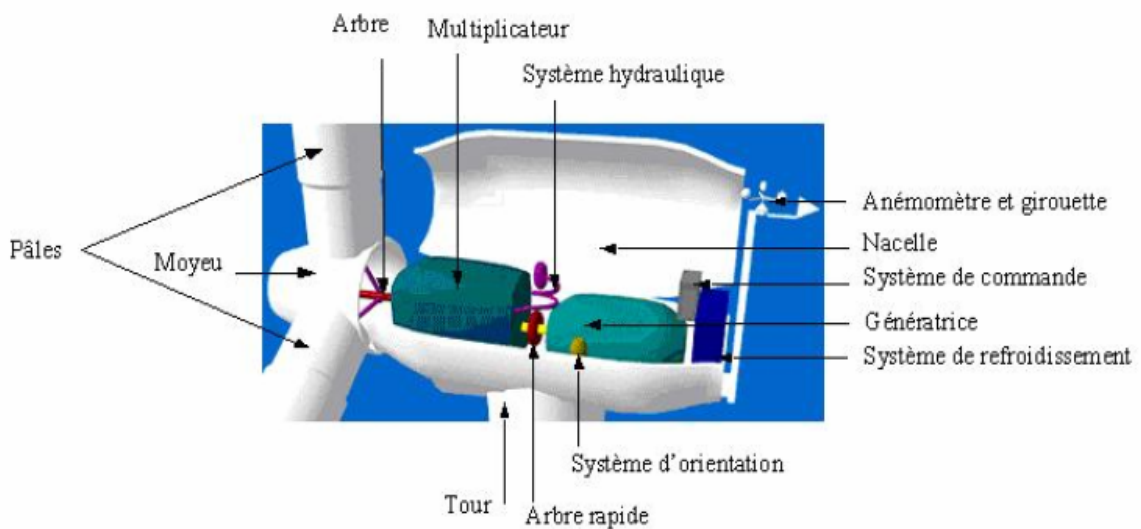


Fig.I.3. Eléments constituant une éolienne [14]

I.4.2.1. LE ROTOR

Le rotor est composé, généralement, de 3 pâles à inclinaison variable. L'autre partie est le collecteur/moyeu qui supporte les pâles sur l'arbre. Le diamètre du rotor est sensiblement identique à la hauteur de la tour : entre 40 et 100 m pour les éoliennes d'environ un mégawatt (les plus courantes).

I.4.2.2. LA NACELLE

La nacelle contient tout le système de production d'énergie, elle est constituée par :

- ↵ Un générateur d'électricité
- ↵ Un échangeur de chaleur
- ↵ Un transformateur
- ↵ Une boîte de vitesse
- ↵ Un système de refroidissement
- ↵ Un contrôleur de puissance
- ↵ Un arbre principal.

I.4.2.3. LA TOUR

La tour est l'un des principaux composants d'une éolienne car elle supporte le poids de l'ensemble. Elle a une hauteur allant de 40 m pour les plus petites (~400kW) à 140 m pour les plus grandes (~3.5MW).

La turbine éolienne est munie de pâles fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 *tr/mn*. Plus le nombre de pâles est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [3].

Les turbines unies et bi-pâles ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

En effet, lorsque la pôle supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Lorsque des pâles fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/mn). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600 KW et 2,5 MW. Mais il y'a aussi les synchrones et à réluctance variable.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de controle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système de controle-commande comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement général de ces deux procédés.

I.4.3 LES EOLIENNES À VITESSE FIXE

A - PRINCIPE GENERAL

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau selon figure (I.4). Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

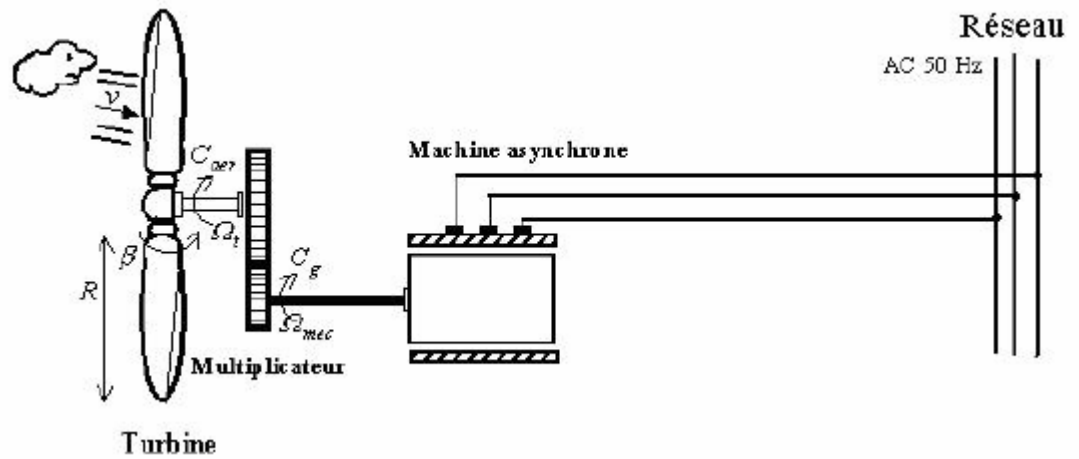


Fig.I.4. Eolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone selon figure (I.5) et génère de la puissance électrique sur le réseau [15]. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme ($\Omega_s = 1500$ tr/mn), ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur de vitesse.

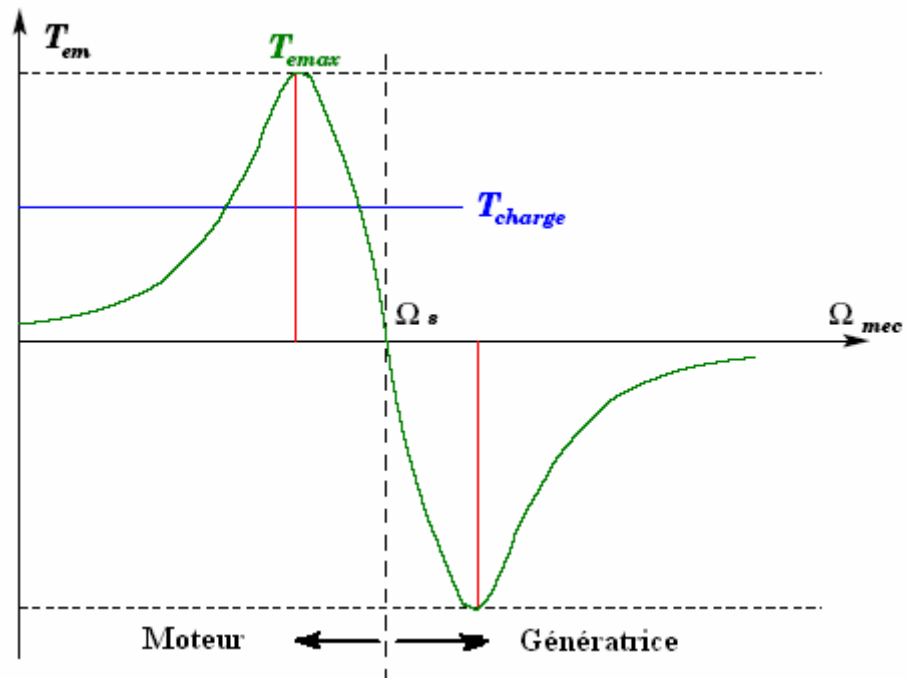


Fig.I.5. Caractéristique couple -vitesse.

I.4.4 LES EOLIENNES A VITESSE VARIABLE

A – PRINCIPE

Les deux structures existantes à vitesse variable sont représentées figure (I.6) :

- la configuration de la figure (I.6.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.
- La configuration de la figure (I.6.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

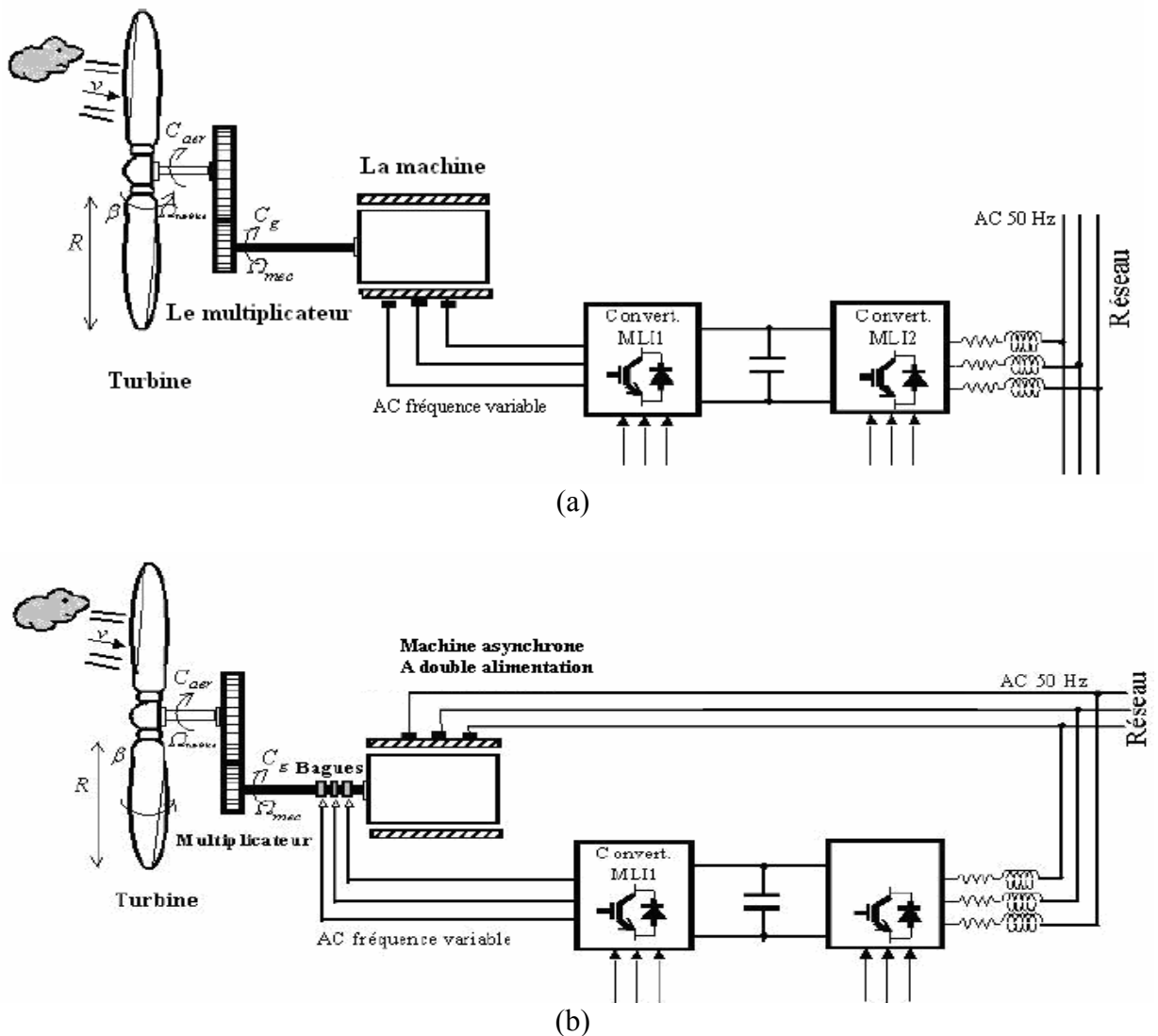


Fig.I.6. Eoliennes à vitesse variable

B - INTERET DE LA VITESSE VARIABLE

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.7).

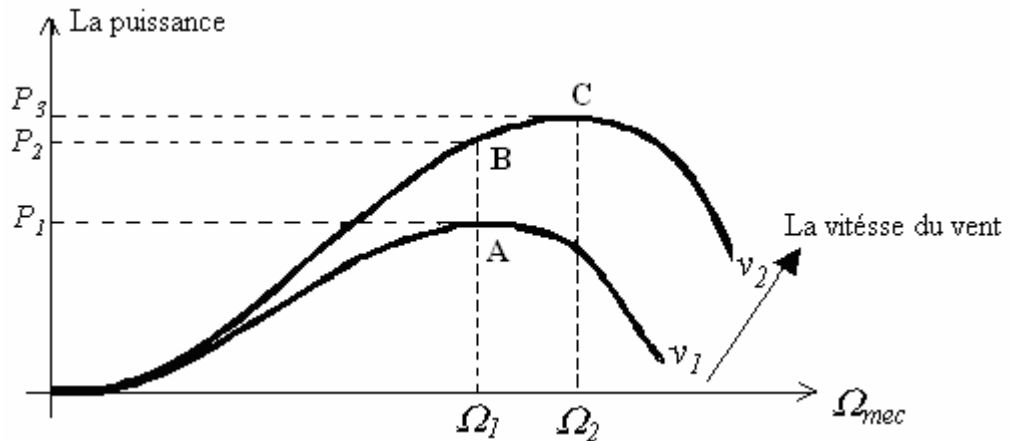


Fig.I.7. caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

Dans la partie suivante, nous expliquons la modélisation détaillée d'une turbine éolienne.

I.5 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

I.5.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES POUR LA MODELISATION MECANIQUE DE LA TURBINE

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à la vitesse de la turbine et qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure I.8).

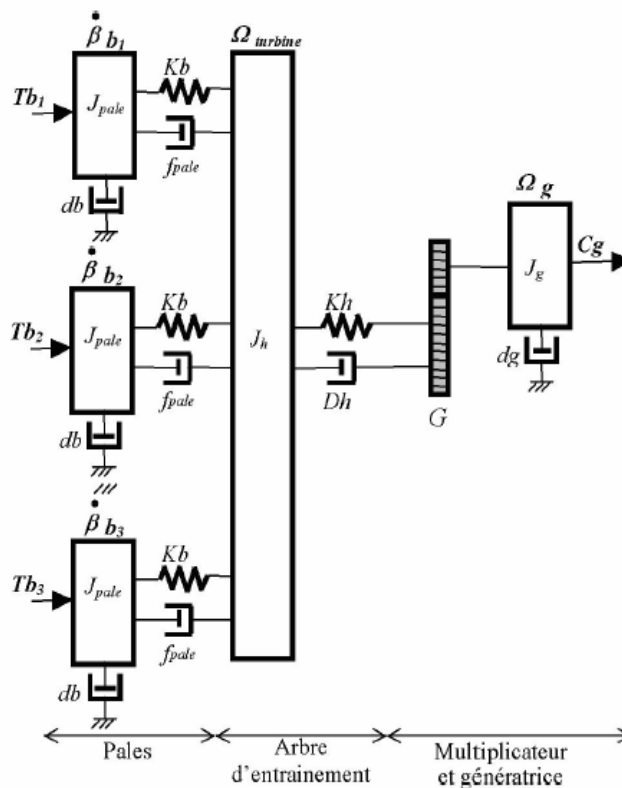


Fig.I.8. Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- ↪ la même inertie J_{pale}
- ↪ la même élasticité Kb
- ↪ le même coefficient de frottement par rapport à l'air db .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}_{b_1}$, $\dot{\beta}_{b_2}$, $\dot{\beta}_{b_3}$. Chaque pale reçoit une force Tb_1 , Tb_2 , Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [16].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- ↳ son inertie Jh
- ↳ son élasticité Kh
- ↳ son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- ↳ une inertie Jg
- ↳ un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (Cg) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré.

De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Fig.I.9) dont la validité, par rapport au modèle complet, a déjà été vérifiée [17].

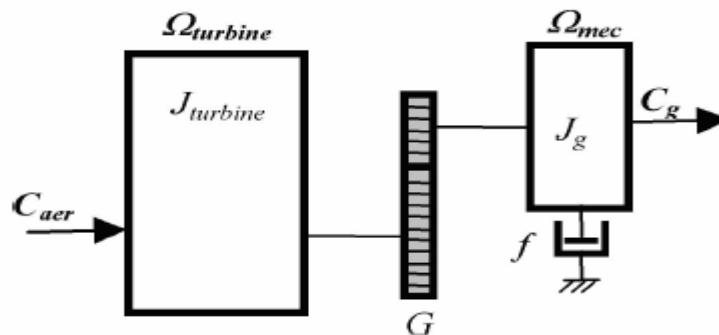


Fig.I.9. Modèle mécanique simplifiée de la turbine

I.5.2 MODELISATION DE LA TURBINE

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Fig. I.10).

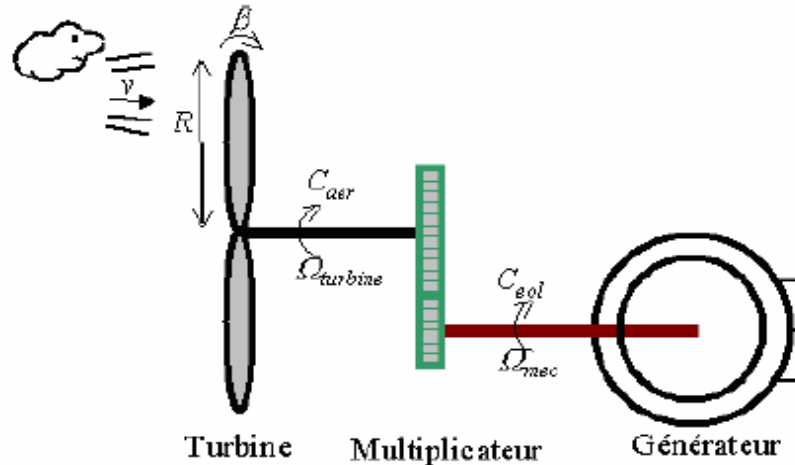


Fig.I.10. Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent est définie de la manière suivante [18] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \tag{I-5}$$

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p \cdot P_{vent} \tag{I-6}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [18, 19].

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par : [20]

$$C_{aer} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \tag{I-7}$$

I.5.3 MODELE DU MULTIPLICATEUR DE VITESSE

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure I.10). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (I-8)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I-9)$$

I.6. TYPES DE GENERATEURS ELECTRIQUES EOLIENS

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines *synchrones* et les machines *asynchrones* sous leurs diverses variantes, pour lesquelles nous examinerons les principales caractéristiques de chaque type [3, 21, 33] :

- **Générateur synchrone:** c'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [6].

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du

multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [6].

La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS [22].

· **Générateurs asynchrones** : La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent [22].

· **Générateurs à réluctances variables** : Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple . Ce type de machine pourrait être un candidat pour de futures éoliennes [6].

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments constitutifs d'une éolienne. Dans ce contexte, nous avons présenté un modèle de la turbine et du multiplicateur de vitesse à adapter au générateur retenu. Puis nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable, ainsi que les configurations de générateurs associés, essentiellement de type *synchrone* et *asynchrone*.

Toutefois, nous assistons de plus en plus à l'émergence de générateurs moins conventionnels tels que les GRV et qui vont faire l'objet du contenu du *chapitre II* suivant.

Chapitre II

Les Machines

A Réluctance Variable

II.1. INTRODUCTION

Le principe des machines à réductance variable (MRV) 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 est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active (stator) et l'autre passive (rotor). 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 [23].

La machine à réductance variable à double saillance (MRVDS) dont les phases sont alimentées en courants unidirectionnels par des convertisseurs à demi-ponts asymétriques, constitue certainement la solution la plus économique grâce aux matériaux utilisés (tôles fer-silicium et cuivre) et à sa simplicité de fabrication (empilage de tôles, bobines préfabriquées, rotor passif naturellement équilibré...). Ses performances peuvent être comparables à celles des machines à aimants permanents. Elle peut aussi fonctionner à puissance maximale constante. Mais elle produit un couple très pulsatoire à haute vitesse et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents [24].

Dans le présent chapitre, nous présenterons les différents types de machines à réductance variable selon leurs constructions puis nous procéderons à une étude théorique de leur fonctionnement en association avec leur alimentation.

II.2. PRINCIPE DE BASE [22, 25, 27, 28]

Quel que soit le type de machine à réductance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de la structure monophasée élémentaire représentée (Fig.II.1). Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant i et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui interpolaire de la pièce fixe.

Le flux magnétique créé par les ampères-tours (Ni) oscille entre 2 valeurs extrêmes correspondant aux 2 positions : [34]

- une position d'**opposition** (Fig. II.1.a) dans laquelle le circuit magnétique présente une réductance maximale, ou une inductance minimale ;
- une position de **conjonction** (Fig. II.1.b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réductance minimale, ou une inductance maximale.

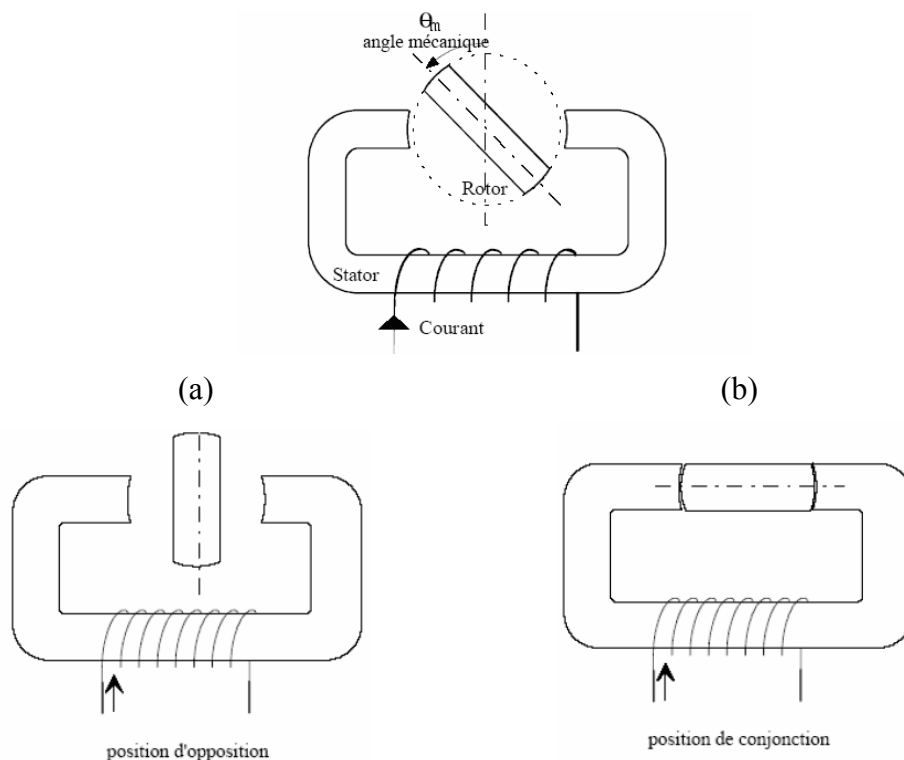


Fig. II.1 Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor

A partir de la position d'opposition ($\theta_m = 0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi/2$), selon la règle du « flux max. ou de la réductance min. », et ainsi de suite ...

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est : $T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_m}$, l'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Fig.II.2) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

- **moteur** ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} > 0 \right)$.
- **générateur** ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} < 0 \right)$.

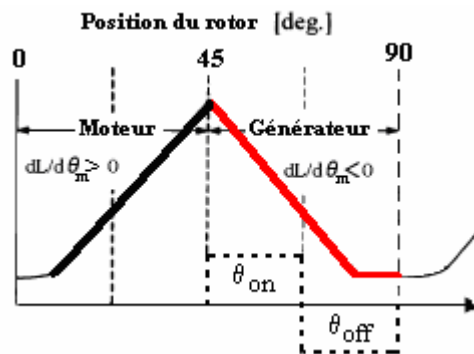


Fig. II.2 Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor [31]

Typiquement, il y a un nombre inégal de pôles saillants au stator et au rotor. Il existe pour cela des règles régissant le nombre de dents statoriques N_s et rotoriques N_r ainsi que le nombre de phases k pour assurer un bon fonctionnement de la MRV. Dans notre application nous avons choisi une MRVDS triphasée à $N_s=6$ dents stator et $N_r=4$ rotor (Fig. II.3.a).

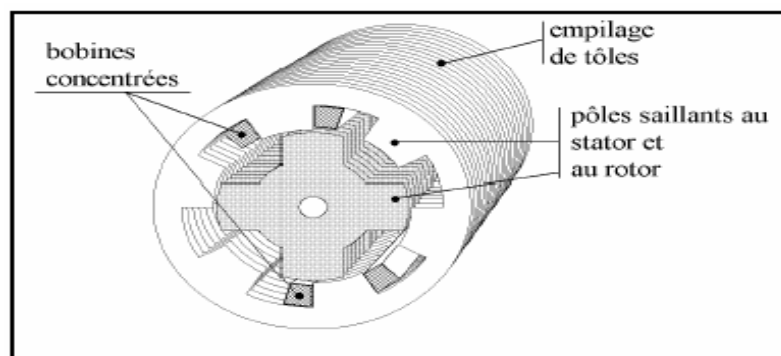


Fig. II.3.a Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, l'injection d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réductance minimale (flux maximal) ; on observe ainsi une rotation du rotor vers la position de conjonction. Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on peut répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation (Fig. II.3.b).

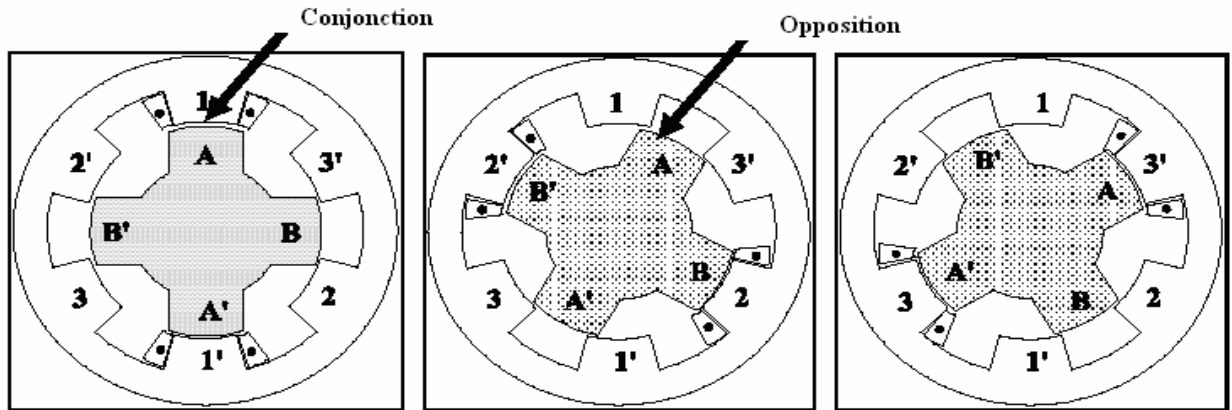


Fig. II.3.b Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4.

La période de variation de la réductance vue d'une phase correspond au passage de la conjonction d'une dent à la conjonction de la dent suivante.

La relation entre angles électrique θ_e et mécanique θ_m est donnée par :

$$\theta_e = N_r \cdot \theta_m \tag{II-1}$$

II.3. DOMAINES D'UTILISATION DES MRV [26]

En pratique, on distingue deux domaines d'application des moteurs à réductance variable :

- **Utilisation en moteur pas à pas** : on envoie un certain nombre d'impulsions sur les bobines des phases successives : le rotor avance d'un nombre de pas égal au nombre d'impulsion. Cette utilisation, la plus classique, permet de réaliser des déplacements ou des positionnements précis avec une commande en boucle ouverte. Plus la précision demandée est grande, plus il faut de pas par tour.

- **Utilisation en moteur à vitesse variable** : en concurrence pour certaines applications avec le moteur asynchrone à cage ou le moteur synchrone à aimants permanents.

Le moteur à réductance variable est alors à commutation ; c'est-à-dire que le courant dans chacune des phases est à chaque période établi puis coupé par un convertisseur.

II.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MRV [22, 29]

Par rapport aux machines classiques AC et DC, les MRV présentent les avantages suivants:

- structure simple et robuste pour un faible coût de fabrication
- possibilité de fonctionnement à puissance quasi constante sur une large plage de vitesse
- pertes essentiellement concentrées au stator donc refroidissement aisé
- fonctionnement dégradé possible grâce à l'indépendance de chaque phase
- couple massique relativement élevé, ...

La MRV a cependant quelques limites :

- elle doit être commutée électroniquement et ne peut donc être alimentée directement par une source alternative (AC) ou (DC)
- ses caractéristiques magnétiques non linéaires compliquent son analyse et son contrôle
- sa structure dentée, cause d'oscillations de couple et de bruits, surtout à vitesse élevée

II.5. DIFFERENTS TYPES DE MRV

II.5.1 MRV LENTES POUR LES APPLICATIONS EOLIENNES

La machine à réductance variable a été le premier moteur électrique conçu et a d'abord été utilisée pour l'horlogerie dans les années 1850. Cette machine a depuis trouvé d'autres champs d'application. Un article de 1927 présente un moteur 6/4 pour la génération d'électricité dans les navires de guerre. C'est à partir des années 1970 que la MRV prend son essor grâce à l'apparition d'une électronique de commande performante [22, 23].

La MRV pure, dont il existe des variantes qui seront présentées plus loin, a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator actif où sont situés les bobinages et un rotor passif (Fig.II.3.a). Le rotor passif distingue la MRV des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ « pulsé ».

Les MRV que nous allons présenter sont des machines dédiées aux applications éoliennes car offrant des caractéristiques intéressantes pour la basse vitesse de rotation. On notera que malgré son potentiel, la MRV n'a pas encore trouvé d'application industrielle dans l'éolien.

A. MRV « Pures »

Cette MRV est principalement utilisée dans l'industrie pour les systèmes de démarreur alternateur dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'aérospatial [37]. Ces applications sont caractérisées par une grande vitesse de rotation et l'absence de pertes au rotor présente un avantage certain.

Pour une MRV alimentée par des courants de forme rectangulaire, la vitesse de rotation du rotor est liée à la pulsation des courants statoriques ω et au nombre de dents au rotor N_r par la relation suivante :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r} \quad (\text{II-2})$$

La vitesse de rotation est ainsi directement liée au nombre de dents au rotor. La MRV réalise un réducteur électromagnétique avec le nombre de dent au rotor. De plus, la possibilité d'utiliser des plots dentés permet d'augmenter le nombre de dents tout en gardant un nombre d'encoches

raisonnable. Cet avantage a conduit plusieurs auteurs à étudier la MRV pour les applications éoliennes [38, 39, 40, 41, 42, 43].

Torrey étudie le fonctionnement d'une machine basse vitesse 24/16 en mode générateur. Il montre l'avantage de cette structure mais obtient dans certaines conditions un régime instable conduisant à un courant élevé et incontrôlable. Il note que ce régime d'instabilité est spécifique au mode générateur et n'existe pas en mode moteur.

Comme les machines à fort couple aboutissent à des rotors creux [44, 45], il peut sembler judicieux d'ajouter un stator à l'intérieur de la machine pour accroître le couple volumique. La machine de la figure (II.4) montre une MRV à plots dentés munie d'un stator intérieur supplémentaire [46]. L'inconvénient de cette structure réside dans sa complexité mécanique.

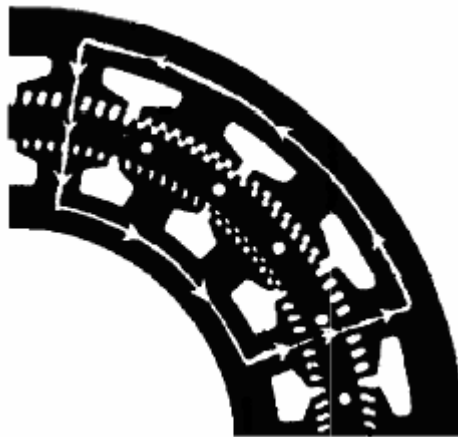


Fig.II.4 MRV à plots dentés à double stator

B. MRV VERNIER

Alors que la MRV « pure » est alimentée par des courants de forme rectangulaire la MRV vernier est alimentée par des courants sinusoïdaux. En effet, le pas dentaire au rotor et au stator est légèrement différent, ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale. Le fonctionnement de cette machine (excitée au rotor et au stator) est similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse. L'avantage de cette structure est que l'on peut lui associer un convertisseur classique.

La structure de la figure (II.5) est excitée au rotor [41]. Le même principe peut être appliqué avec une excitation au stator [47]. Elle dispose de N_s dents au stator et N_r dents au rotor et p et p'

sont les polarités des circuits induit et inducteur. Le respect de la condition « $\pm N_s \pm N_r = \pm p \pm p'$ » permet de générer un couple à la vitesse de synchronisme donné par :

$$\Omega = \frac{\omega \pm \omega'}{N_r \pm a.p'} \quad (\text{II-3})$$

avec ω et ω' les pulsations de l'induit et l'inducteur et a une constante égale à 0 ou 1 selon que le circuit d'excitation est disposé au stator ou au rotor.

On remarque que comme pour la MRV « pure », la vitesse de rotation est liée au nombre de dents au rotor. Pour une fréquence d'alimentation donnée, l'augmentation du nombre de dents au rotor N_r permet de diminuer la vitesse de rotation. C'est un grand avantage car il est plus simple mécaniquement de diminuer la taille des dents que celle des pôles.

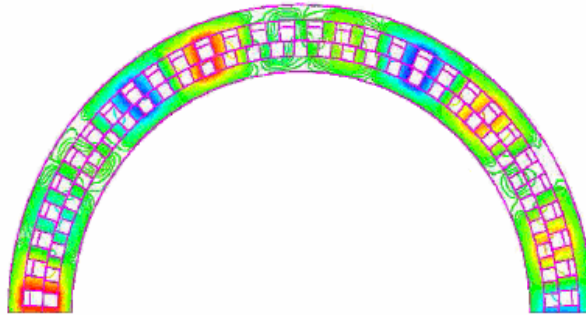


Fig.II.5 MRV excitée à effet vernier

C. MRV HYBRIDES

Les MRV hybrides utilisent des aimants permanents afin d'améliorer les performances de la machine. La MRV de la figure (II.6) met en oeuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet Vernier pour une alimentation sinusoïdale [36, 41, 48]. La condition de fonctionnement est ici $|N_s - N_r| = p$ avec p le nombre de paires de pôles. La vitesse de rotation est liée à la pulsation d'alimentation et est donnée par $\Omega = \frac{\omega}{N_r}$. On notera que cette formule est la même que pour la

MRV « pure ». Les structures hybrides possibles sont innombrables et une grande place est laissée à l'originalité comme en témoigne la machine à « plots aimantés » de la figure (II.7). Le grand nombre de dents rend cette structure intéressante pour les forts couples. Cette machine utilise des aimants en terre rare spéciaux afin d'éviter leur démagnétisation [49].

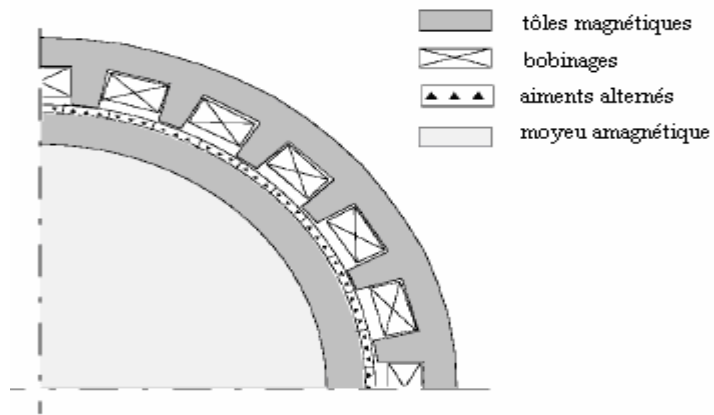


Fig.II.6 MRV hybride à effet vernier

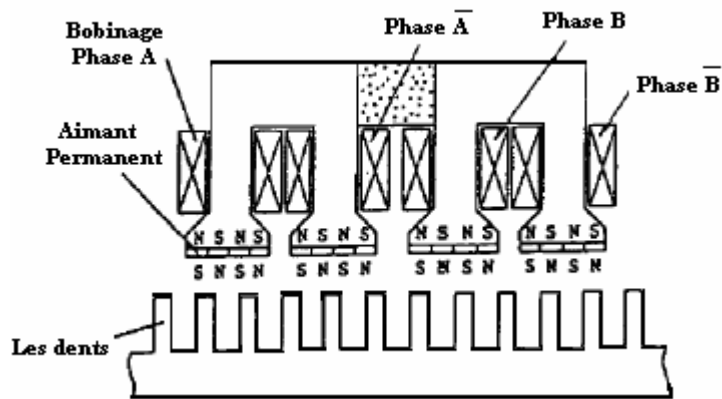


Fig.II.7 MRV à plots aimantés

D. MRV A FLUX AXIAL

Cette machine a été appliquée à la propulsion marine au début des années 1970 [50].

Les structures étudiées dans [51] et [52] sont non-excitées. Les caractéristiques sont similaires à celles de la machine synchrone à flux axial à savoir un fort couple massique mais avec des contraintes mécaniques importantes.

Du point de vue construction de MRV, on distingue deux grandes catégories: [27, 28]

- les machines à stator lisse.
- les machines à double denture.

II.5.2. MACHINES À STATOR LISSE

Dans ce type de machine, le stator est cylindrique de révolution de rayon r_s dans lequel sont creusées des encoches destinées à loger les conducteurs. La définition du stator lisse est due surtout à la faiblesse de la largeur des encoches au niveau de l'entrefer qui constituent une irrégularité locale négligeable dans la géométrie. [28]

On peut ainsi calculer, au niveau de chaque encoche, la densité de courant équivalente au courant $N.i$ passant dans le conducteur qui y est logé, la perméabilité du stator étant supposée infinie, la densité de courant équivalente [27] sera donc égale à:

$$J = \frac{N.i}{\varepsilon} \tag{II-4}$$



Fig.II.8 Densité de courant équivalente

II.5.3. MACHINES À DOUBLE DENTURE

Ce sont des machines dont le stator, vu l'importance de ses encoches relativement à la denture rotorique, ne peut être assimilé à un stator lisse, Les irrégularités locales dues au positionnement relatif des dents rotoriques et statoriques sont d'ailleurs la cause de la conversion d'énergie. La figure (II.9) représente une MRV à double denture avec six pôles statoriques et quatre pôles rotoriques, ne comportant ni conducteur électrique ni aimant, ce qui lui confère une grande robustesse et une extrême simplicité.

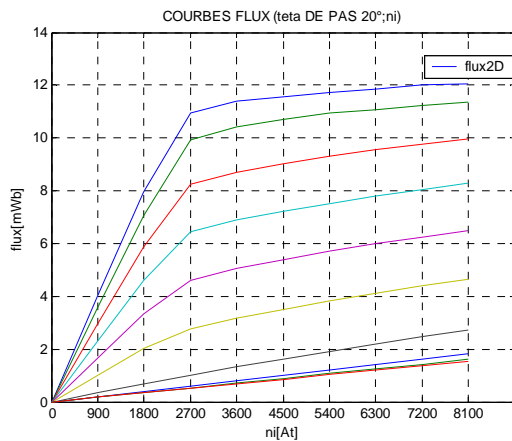


Fig. II.9 Machine à double denture. [27]

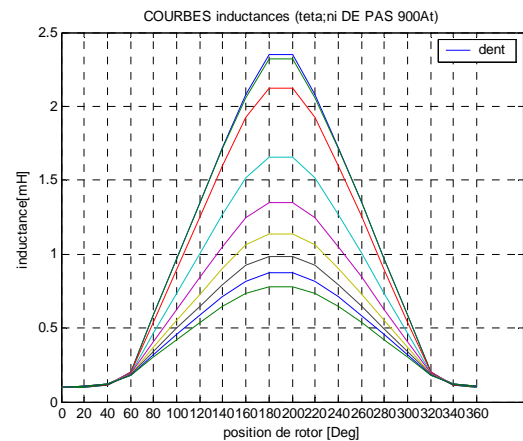
II.6. CARACTERISTIQUES ELECTROMAGNETIQUES – ENERGIE - COUPLE [28]

Dans une MRV, le flux varie en fonction de la position du rotor et des ampères tours injectés dans une phase du stator, soit : $\Psi = \text{fonction}(N.i, \theta)$.

De ces caractéristiques électromagnétiques (Fig. II.10.a), nous pouvons déduire l'allure de l'inductance en fonction de la position et l'état de saturation (Fig. II.10.b).



(a)



(b)

Fig. II.10.a Caractéristique flux-At (pas de $\theta = 20^\circ$)

Fig. II.10.b Evolution de l'inductance avec la position pour différentes excitations

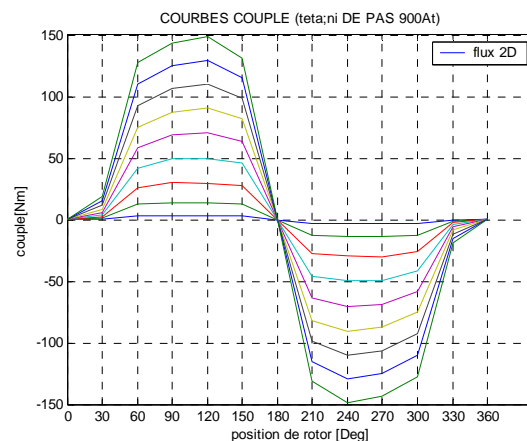


Fig. II.10.c Allure du couple en fonction de la position et de l'état de saturation

Nous pouvons aussi en déduire le couple développé (Fig.II.10.c) ou le calculer selon la méthode des travaux virtuels à partir d'une variation d'énergie ou de coénergie (Fig.II.11) entre les deux positions extrêmes (conjonction et opposition):

- énergie magnétique : $W_e = \int i \cdot \partial \psi$ (II-5-a)

$$Te = - \left(\frac{\partial W_e}{\partial \theta} \right)_{\psi = cst} \quad (II-5-b)$$

- coénergie : $W_c = \int \psi \cdot \partial i$ (II-6-a)

$$Te = \left(\frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right)_{i = cst} \quad (II-6-b)$$

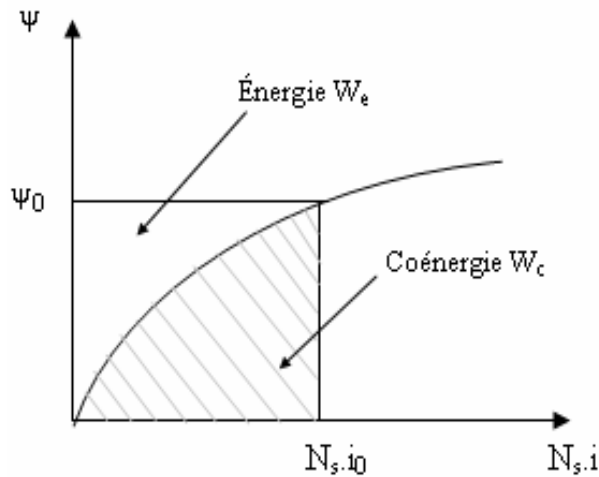


Fig. II.11 Représentation de l'énergie et de la coénergie.

En **régime linéaire**, on montre que le couple s'exprime de la manière suivante :

$$Te = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (II-7)$$

qui indique que le couple ne dépend pas du sens du courant d'où possibilité d'une alimentation en courant unidirectionnel. Par contre, le couple dépend de la dérivée de l'inductance L par rapport à la position du rotor θ , d'où les deux types de fonctionnements déjà présentés dans la figure (II.2).

Nous allons à présent examiner plus en détail le fonctionnement **générateur**, objet de ce travail.

II.7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE GRV

La génératrice à réductance variable est désirable dans le futur, elle contient une structure simple et solide se qui nous permet de l'a utiliser dans les centrales éolienne.

La technologie du générateur à réductance variable est basée sur les concepts que magnétisé vis-à-vis des pôles attire. Typiquement, il y a nombre inégal des pôles saillants sur le stator et rotor. Tous les deux sont construits avec de l'acier électrique stratifié de catégorie [25].

Tous les noyaux de fer du stator et du rotor dans la GRV sont les pôles saillants. La distribution du champ magnétique est différente quand la position relative entre le pole de rotor et la phase électrique sur le stator est différente. Ainsi l'inductance L d'enroulement changera avec le changement de la position relative entre le pole de rotor et le pole de stator. Quand le rotor tourne, l'inductance des enroulements changera du maximum L_{max} en le minimum L_{min} périodiquement. L'inductance atteint le maximum quand les pôles de rotor et les pôles de stator sont en même position et minimum d'extensions quand les pôles de rotor et les pole de stator sont en opposition [29].

II.7.1. LES DIFFERENTES PHASES DE LA GRV

La GRV comprend deux phases de fonctionnement dans une période électrique :

- *phase (1) : d'excitation ou de magnétisation.*
- *phase (2) : de génération électrique.*

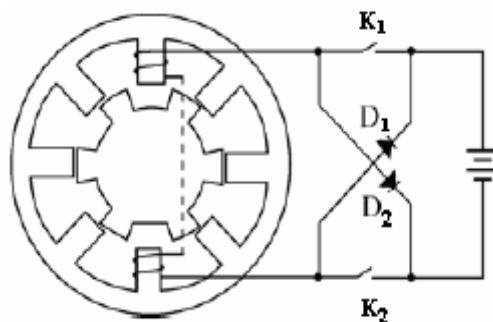


Fig. II.12 Représentation d'une GRV [29]

- *phase (1)* : quand $[K_1, K_2]$ fermés le bobinage du stator est excité par un circuit externe (Fig.II.12.a); l'énergie électromécanique fournie par le circuit externe est convertie en énergie magnétique.

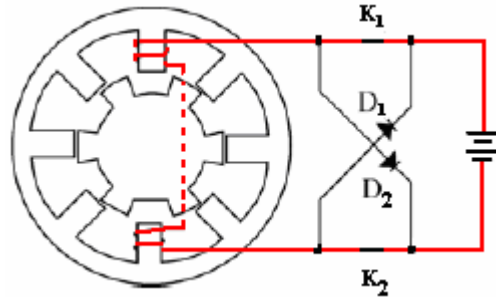


Fig. II.12.a Phase de magnétisation

- *phase (2)* : quand $[K_1, K_2]$ ouverts et $[D_1, D_2]$ fermés, les énergies magnétique et mécanique sont converties en énergie électrique qui alimente de nouveau la source ou la charge. (Fig. II12.b)

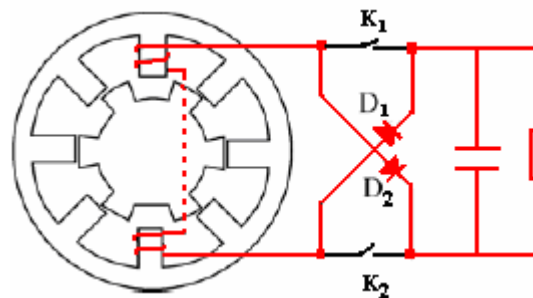


Fig. II.12.b Phase de génération.

II.8. MODES D'EXCITATION DE LA GRV [22, 29, 30]

La génératrice à réductance variable peut fonctionner en excitation séparée ou en auto excité.

- **Dans la GRV à excitation séparée**, la boucle de l'excitation est indépendante de la génération ; elle est réalisée en permanence par un circuit externe composé d'une source continue et d'un interrupteur.

Parce que l'excitation est fournie par une source extérieure pendant le processus courant entier du GRV, il n'y a aucun rapport entre la tension d'excitation et la tension de sortie à ce moment-là et les deux tensions peuvent être ajustées indépendamment. Par conséquent, le contrôle de l'excitation séparée est commode.

- **Dans la GRV auto excitée**, l'excitation initiale est fournie par une source extérieure de tension. Quand la tension générée (V_{DC}) atteint sa valeur de régime permanent (la valeur régulière pour le contrôle), la source extérieure est déconnectée. Alors l'excitation sera fournie par la tension produite par la GRV elle-même.

Pour ce mode, le volume de système est très réduit et l'efficacité est élevée, parce qu'il n'y a aucune source externe quand la tension est établie. La magnétisation est alors assurée et maintenue par la suite par un condensateur C_{DC} [22, 29, 30].

II.9. L'ALIMENTATION DE LA GRV

L'alimentation de la génératrice a réductance variable se fait par un convertisseur de puissance triphasé en demi-pont asymétrique.

II.9.1. CONVERTISSEUR DE PUISSANCE [28, 32]

On associe à la machine à réductance variable un onduleur triphasé en demi-pont asymétrique (Fig.II.13). La structure du convertisseur a été choisie pour sa simplicité, sa robustesse et l'indépendance qu'il procure à chacune des phases. D'où le choix de cette structure pour un avant-projet.

Afin de générer du courant avec une machine à réductance variable il est nécessaire d'alimenter ses phases lors de la décroissance de l'inductance. En effet c'est dans cette région que la force contre électromotrice en $i \cdot \omega \cdot \frac{dL}{d\theta}$ est négative et va permettre de générer de la puissance électrique.

L'augmentation de la vitesse joue également en faveur des possibilités en débit, puisqu'elle intervient aussi dans l'expression précédente.

Cependant, du fait que l'on impose une tension en créneaux aux bornes de chaque phase sans découpage, on ne peut exercer un contrôle sur la forme d'onde du courant. La seule manière d'agir sur ce dernier passe donc par les deux angles de commande θ_{on} et θ_{off} (Fig. II.2).

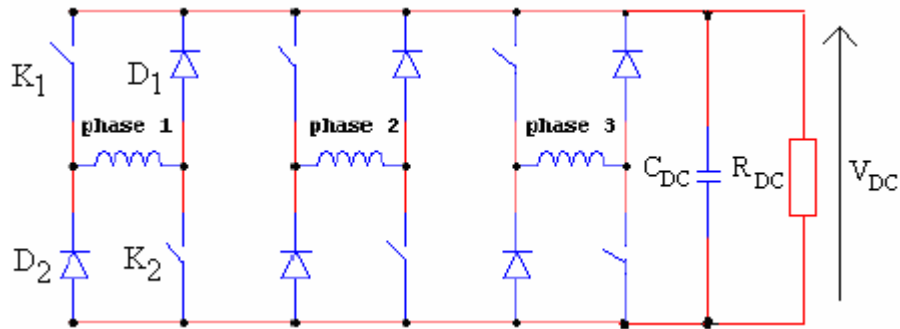


Fig.II.13 Demi pont asymétrique.

La problématique de la commande en générateur des machines étudiées se pose donc dans les termes suivants : trouver les paramètres de commande θ_p et ψ_p tels que : l'on soit en mode **générateur** c'est-à-dire que les courants puissent suffisamment magnétiser les phases de la machine afin de récupérer assez d'énergie lors des périodes de roue libre par rapport aux périodes de conduction des interrupteurs de puissance [28].

L'obtention d'un couple positif permettant d'entretenir le mouvement de rotation est subordonnée à l'alimentation des phases lorsque la dent du rotor s'approche de la dent du stator c'est-à-dire pendant la phase de croissance de la perméance de la phase (Fig.II.14.a).

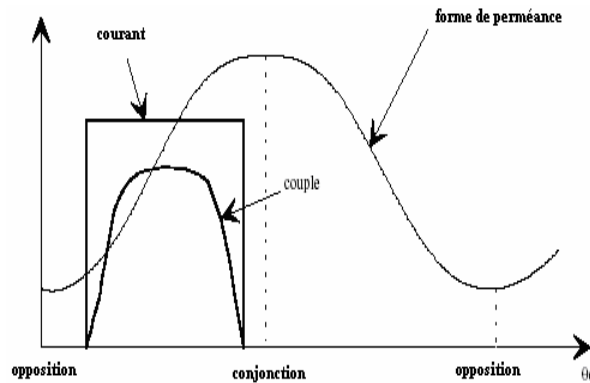


Fig. II.14.a Alimentation en mode moteur.

A l'inverse, l'alimentation de la phase lors de la décroissance de la perméance engendre un couple négatif et donc un fonctionnement générateur de la MRV (Fig.II.14.b).

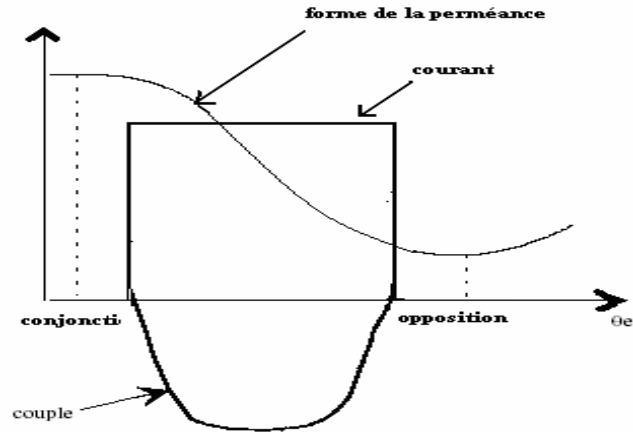


Fig. II.14.b Alimentation en mode générateur.

II.9.2. PARAMETRES DE COMMANDE EN MODE GENERATEUR

Deux angles électriques viennent paramétrer la commande de la GRV comme la montre la figure (II.15) :

- ψ_p : Angle d'avance
- θ_p : Angle de conduction

Ces deux angles sont les mêmes pour chacune des phases. C'est à partir de ces paramètres que l'on a tenté de dégager des lois de commande en mode générateur.

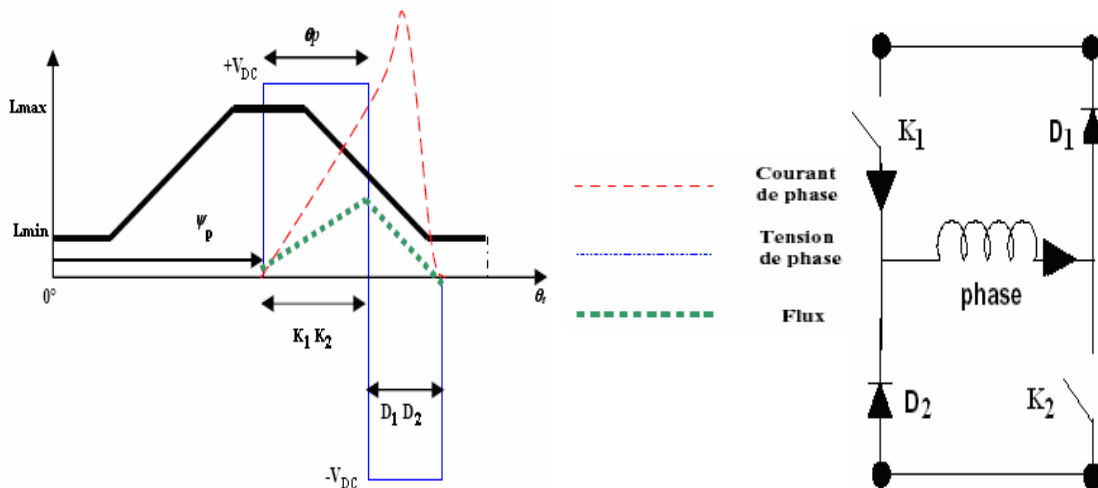


Fig.II.15 Paramètres de commande.

Les différents modes de fonctionnement de la MRV sont résumés dans les tableaux suivants :

- en mode **moteur** (Tab.II.1) avec la f.e.m est positive, si les interrupteurs K_1 et K_2 sont fermés, la tension du bus continu $+V_{DC}$ est appliquée et le courant augmente. Pour une tension nulle ((K_1, D_1) ou (K_2, D_2) passants) le courant décroît en phase de roue libre. Si D_1 et D_2 sont passantes, la tension est négative et le courant décroît.

	V_{phase}	Interrupteurs fermés
Courant croissant	$+V_{DC}$	K_1, K_2
Courant décroissant	$-V_{DC}$ 0	D_1, D_2 $2, D_2$ ou K_1, D_1 K

Tab.II.1 Etat des interrupteurs pour un fonctionnement moteur

- en mode **générateur** (Tab.II.2) avec la f.e.m est négative, si la tension du bus continu V_{DC} est appliquée sur la phase « k » ($V_k = V_{DC}$), alors le courant augmente.

Pour une tension de phase V_k nulle, le courant croit en phase de roue libre.

Si la tension V_k est négative, le courant décroît. Le mode générateur pose un problème qui n'existe pas en mode moteur à cause de la f.e.m négative. En effet, si la f.e.m est supérieure à la tension du bus continu V_{DC} alors le courant est croissant lorsque D_1 et D_2 conduisent et il n'existe plus de configuration ou le courant est décroissant. Dès lors le courant augmente sans qu'aucun contrôle ne soit possible (perte de commandabilité du convertisseur). Pendant la phase de roue libre, il est possible de travailler avec K_1 et D_1 ou bien K_2 et D_2 . On peut alterner les deux configurations afin de limiter les échauffements et les sollicitations des composants.

	V_{phase}	Interrupteurs fermés
Courant croissant	$+V_{DC}$	K_1, K_2 K_1, D_1 ou K_2, D_2
Courant décroissant	$-V_{DC}$	D_1, D_2

Tab.II.2 Etat des interrupteurs pour un fonctionnement générateur

Pour le contrôle de la GRV, il y a plusieurs paramètres tels :

- les angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$)
- la tension d'excitation
- le mode de contrôle.

Remarques

La tension de sortie du générateur à réductance variable est fortement ondulée. Elle peut être filtrée et réglée. en ajustant la durée du courant d'excitation.

La commutation de l'enroulement du stator est réalisée à l'aide d'un contrôleur [36].

II.10. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de choisir, parmi les différentes structures de MRV existantes, une configuration à double saillance simple type MRVDS 6/4 afin de poursuivre les travaux de recherche de l'équipe qui m'encadre et qui a déjà fait l'objet d'une modélisation numérique par éléments finis en fonctionnement moteur.

Après avoir examiné le fonctionnement de ce prototype en mode générateur qui nous intéresse ici ainsi que les conditions de sa mise en oeuvre, nous allons aborder dans le chapitre suivant la modélisation puis la simulation de la machine associée à son convertisseur et sa commande sous environnement *MATLAB/SIMULINK*.

Chapitre III

Modélisation & Simulation

Du Système GRV-Convertisseur

Turbine Eolienne

III.1. INTRODUCTION

En vue de répondre à de nouvelles exigences, nous constatons ces dernières années un engouement pour l'étude et la mise en application de convertisseurs électromécaniques d'énergie *non conventionnels* dont la **MRV** fait partie pour ses multiples atouts (robustesse, simplicité de construction, faible coût, performances élevées). La plupart des études sur ce type de machine ont surtout porté sur le mode de fonctionnement *moteur* alors que le mode *générateur*, assez marginal au début, commence à intéresser les chercheurs.

En effet, certains avantages offerts par la Génératrice à Réductance Variable en font une machine idéale pour certaines applications telles que le démarreur/générateur du moteur des avions [53], des automobiles [54] ainsi que les générateurs associés aux turbines éoliennes [55]. En plus, elle peut intervenir dans des conditions nécessitant un système de freinage régénérable telles que: les machines à laver, les volants d'inertie ou les voitures électriques hybrides [56].

Toutefois, la GRV est un système non-linéaire, multi-variable et très fortement couplée. Sa modélisation et son analyse ne sont donc pas aisées.

Pour analyser le fonctionnement de la GRV, plusieurs méthodes ont été proposées : à titre indicatif, la référence [57] a adopté le programme "SPICE" qui présente des limitations ; la référence [58] emploie la technique de « *programmation orientée objet* » qui est très flexible mais très difficile à mettre en oeuvre du fait qu'elle ait besoin du modèle mathématique complet du système ; la référence [59] introduit quelques modèles et *fichier.m* sous environnement *MATLAB* pour construire le modèle mathématique non-linéaire des courbes de magnétisation ; cette méthode est assez précise mais le temps de simulation est très élevé ; la référence [60] présente une nouvelle méthode de modélisation qui combine les avantages des méthodes basées sur la simulation de circuit et la simulation d'équations différentielles. Dans ce modèle, le convertisseur de puissance, la source d'excitation et les charges sont modélisés en utilisant les boîtes à outils de la bibliothèque *SIMULINK* sous *MATLAB* ; toutes les autres composantes du système comme l'inductance du bobinage statorique, le générateur d'impulsions du convertisseur de puissance et le convertisseur d'angle ont été introduits par des fonctions *MATLAB* et les modèles de base de *SIMULINK*. Le modèle construit dans cette référence est très flexible, le temps de simulation très court et le travail présenté offre une nouvelle approche pour les caractéristiques de la GRV.

En nous inspirant de cette approche, nous avons établi dans ce chapitre le modèle théorique d'une GRV 6/4. L'étude a porté sur les caractéristiques électriques (courants, tensions), magnétiques (flux) et mécaniques (vitesse et couple) de la machine. Le modèle théorique sera validé, par la suite, par une simulation sous MATLAB/SIMULINK. Comme application pratique de cette GRV 6/4, nous l'avons associée à une turbine éolienne et simulé l'ensemble.

III.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

- ↳ Les paramètres de chaque phase sont symétriques.
- ↳ L'inductance mutuelle et l'inductance de fuite sont négligées.
- ↳ Ignorer les phénomènes d'hystérésis et de courants induits de Foucault.
- ↳ La résistance est indépendante de la température.
- ↳ Les interrupteurs sont parfaits.
- ↳ La tension d'excitation est parfaitement continue.

Remarque :

Les calculs de flux, d'inductance, de la f.e.m et du couple sont effectués en faisant l'hypothèse que les phases sont découplées magnétiquement. Le calcul du couple est alors effectué en faisant la somme des couples produits par chaque phase [22].

Pour un entraînement de type déterminé, toute amélioration du comportement implique une action sur l'un des éléments constitutifs suivants:

- ↳ La machine.
- ↳ L'alimentation.
- ↳ La commande.

Le rôle de l'alimentation est d'appliquer les tensions aux différentes phases de la machine, en synchronisme avec les positions relatives des dentures stator-rotor correspondant au mode **générateur** (séquences de *magnétisation* et de *génération*). Elle doit assurer l'enclenchement d'un bobinage sur ordre de commande ; elle doit également assurer la coupure du courant.

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et simulé la génératrice à réluctance variable pour étudier son comportement dynamique en régime non linéaire.

Pour la simulation de cette machine, nous pouvons utiliser deux stratégies de commande différentes : (i) la première est une commande en tension alors que (ii) la deuxième est une

commande par hystérésis. Cette dernière méthode nous permet de choisir l'angle d'excitation optimal pour réduire l'ondulation du couple de la GRV [27].

III.3. ÉLÉMENTS DU SYSTEME

- ↪ Une génératrice à réluctance variable
- ↪ Un capteur de position du rotor
- ↪ Un convertisseur d'alimentation électrique
- ↪ Un contrôleur.

III.3.1. MODELE NON LINEAIRE DE LA GRV

Pour la génératrice à réluctance variable, il y a trois types de modèles d'inductance : le modèle linéaire, le modèle quasi-linéaire et le modèle non-linéaire [60]. Dans ce travail, pour étudier les caractéristiques réelles de la GRV, selon le modèle non-linéaire d'inductance, un modèle *non-linéaire* de la GRV est établi, basé sur des équations d'interpolation.

Le système étudié se compose de la machine à réluctance variable, du convertisseur de puissance, d'un contrôleur et d'un capteur de position.

Dans ce mémoire, la machine étudiée est une génératrice triphasée à 6 pôles saillants au stator et 4 pôles saillants au rotor (plus connue sous le sigle de GRV 6/4 à double saillance). La topologie de son convertisseur de puissance est un demi-pont triphasé asymétrique en H. Le diagramme simplifié de la structure de la GRV est illustré dans la figure (III.1).

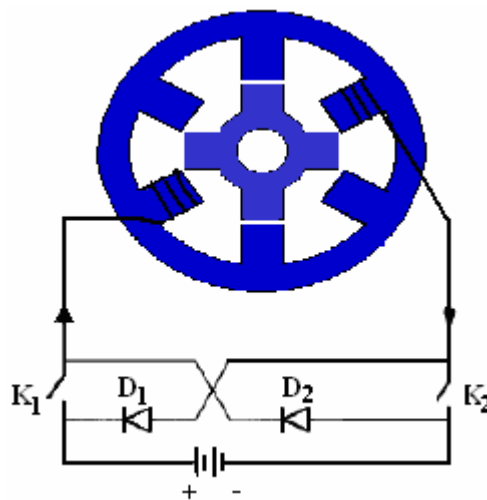


Fig.III.1 Structure simplifiée d'une GRV 6/4.

Le rotor de la génératrice à réductance variable est entraîné par un moteur principal. La position du rotor peut être obtenue par un capteur de position. Le contrôleur générera les signaux de commande selon l'information sur la position du rotor. Les signaux de commande des interrupteurs (type IGBT) du convertisseur de puissance assureront les phases de *magnétisation* et de *génératrice* de l'énergie électrique.

La figure (III.1) montre qu'il y a deux commutateurs K_1 et K_2 , et deux diodes D_1 et D_2 dans chaque phase.

- Quand les deux interrupteurs **K_1 et K_2 sont fermés**, l'enroulement statorique est excité ; le système a absorbé l'énergie de la source d'excitation : phase de *magnétisation*.

- Quand **K_1 et K_2 sont ouverts**, l'enroulement libère l'énergie à travers les diodes D_1 et D_2 , le système fournit l'énergie électrique aux charges externes : c'est la phase de *génératrice*.

Les circuits magnétiques du stator et du rotor de la GRV sont généralement constitués d'un empilage de tôles d'acier au silicium à grains non orientés. La figure (III.1) indique la structure triphasée de la GRV 6/4 où deux pôles saillants du stator diamétralement opposés sont bobinés par deux enroulements connectés en série pour former une phase, Il n'y a aucun aimant ni enroulement sur le rotor (cas des MRV hybrides).

Une bonne démarche qui permettrait d'aboutir à une bonne simulation d'une machine à réductance variable résiderait dans l'utilisation d'une méthodologie qui tienne compte de la non-linéarité de sa caractéristique magnétique tout en minimisant le temps de simulation.

(a) EQUATIONS ELECTROMAGNETIQUES

La tension instantanée appliquée aux bornes de l'enroulement d'une phase de la GRV obéit à l'équation électrique :

$$\pm V_k = R.i_k + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{dt} \quad \text{(III-1)}$$

V_k : Tension appliquée sur chaque phase.

i_k : Courant dans la phase k ($k = A, B, C$).

R : résistance de l'enroulement d'une phase.

$\psi(\theta, i_k)$: Flux statorique totalisé.

Le signe de V_k est déterminé par le mode de fonctionnement de la GRV ; quand le système est excité (phase de *magnétisation*), nous avons $+V_k$; quand le système génère le courant (phase de *génératrice*), nous avons $-V_k$.

A cause de la structure à double saillance de la machine et de l'effet de la saturation magnétique, le flux dans les phases statoriques varie en fonction de la position θ du rotor et du courant de chaque phase. L'équation (III-1) peut être développée comme suit:

$$V_k = R.i + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{di_k} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\psi(\theta, i_k)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{III-2})$$

$\frac{d\psi(\theta, i_k)}{di_k}$: est défini comme étant l'inductance instantanée $L_k(\theta, i_k)$

La vitesse angulaire de rotation est liée à la pulsation électrique par l'expression

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega_e}{N_r} \quad (\text{III-3})$$

Dans le cas non linéaire, le flux dans chaque phase est donné par l'équation:

$$\psi(\theta, i) = L(\theta, i).i \quad (\text{III-4})$$

L'inductance L dépend du courant de phase i et de la position θ du rotor.

On peut réécrire l'équation (III-2) sous la forme:

$$V_k = R.i_k + L(\theta, i_k) \cdot \frac{di_k}{dt} + i_k \cdot \omega \cdot \frac{dL(\theta, i_k)}{d\theta} \quad (\text{III-5})$$

Le terme dû à la variation d'inductance en fonction de la position ($i \cdot \omega \cdot \frac{dL}{d\theta}$) représente la

force contre-électromotrice.

Le circuit équivalent d'une machine à réluctance variable est illustré dans la figure (III.2):

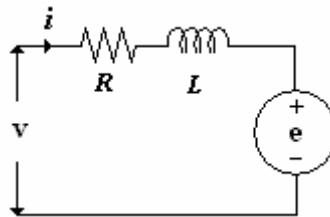


Fig.III.2 Circuit équivalent monophasé de la MRV dans la phase de magnétisation.

(b) CALCUL DE L'INDUCTANCE

Pour simuler le fonctionnement dynamique réel, l'expression reliant l'inductance à la position angulaire du rotor et au courant de phase doit être décrite exactement. Le circuit magnétique de la GRV est saturé (non-linéaire) ; l'expression de son inductance peut être approchée en utilisant les séries de Fourier. Dans ce cas, en effectuant un développement limité au premier ordre, nous aurons l'expression de l'inductance par phase statorique

$$L_k(\theta, i_k) = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos(N_r \cdot \theta + \pi) \quad \text{(III-6)}$$

où

$$L_0(i) = \frac{L_{\max}(i) + L_{\min}(i)}{2} \quad \text{(III-7)}$$

$$L_1(i) = \frac{L_{\max}(i) - L_{\min}(i)}{2} \quad \text{(III-8)}$$

L_{\max} , L_{\min} désignant respectivement les inductances des positions de conjonction (alignement des dents statoriques et rotoriques), et d'opposition (non-alignement des dents statoriques et rotoriques).

De ce qui précède, il est très important de déterminer L_{\max} et L_{\min} . Elles peuvent être obtenues par l'expérimentation ou par l'analyse par éléments finis (voir Fig.III.3 [61,60]). La Fig.III.3 montre la relation entre l'inductance, la position du rotor et le courant de phase ; elle a été obtenue par la méthode des éléments finis. Cette figure indique qu'en saturé, les 2 inductances extrêmes ont quasiment la même valeur ($L_{\min} = 0.01\text{H}$).

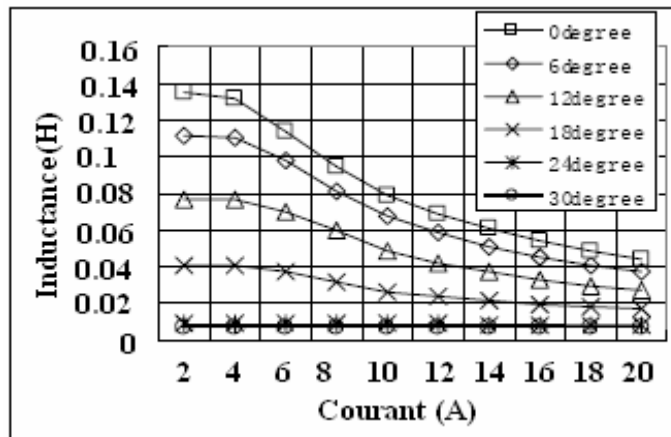


Fig.III.3 Relation entre l'inductance, la position du rotor et le courant de phase [60]

$L_{max}(i)$ peut être modélisée par un polynôme ayant comme variable le courant i et qui peut être obtenue par le lissage de cette courbe, selon la représentation Fig.III.4 et l'expression (III-9).

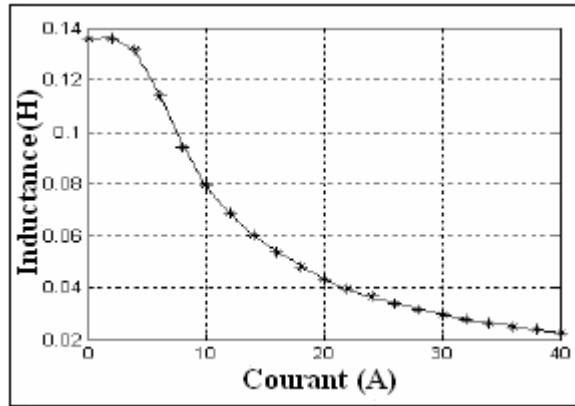


Fig.III.4 Courbe de fitting de $L_{max}(i)$

$$L_{\max}(i) = \sum_{n=0}^3 a_n i^n = 0.136 - 0.0045.i + 0.005.i^2 - 0.0022.i^3 + 0.00035.i^4 \quad (\text{III-9})$$

(c) PRODUCTION DU COUPLE

La variation de réluctance entre les deux positions extrêmes de *conjonction* et d'*opposition* induira une variation d'énergie magnétique d'où résultera un couple moyen non nul.

Le couple de la MRV est égal à la dérivée de la fonction énergie par rapport à la position du rotor :

$$T_e(\psi_1, \dots, \psi_n, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\psi_1, \dots, \psi_n, \theta) \quad (\text{III-10})$$

Avec:

W : énergie,

Ψ : Flux totalisé dans chaque phase.

Appliquons cette relation à une MRV 6/4, on a :

$$T_e(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \theta) = \frac{\partial W}{\partial \theta}(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \theta) \quad (\text{III-11})$$

Les équations mécaniques sont :

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_r - F \cdot \omega \quad (\text{III-12})$$

Où :

J : moment d'inertie de la MRV

T_r : couple résistant

F : coefficient du frottement visqueux.

De la co-énergie:

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot L(\theta, i) \cdot i^2 \quad (\text{III-13})$$

Nous déduisons l'expression du couple :

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot i^2 \quad (\text{III-14})$$

L'expression (III-14) montre que ce convertisseur est unidirectionnel en courant parce que la production du couple ne dépend pas du signe de courant mais seulement de signe de $\frac{dL}{d\theta}$. Puisque le couple d'une MRV est indépendant de la polarité de courant d'excitation, les MRV exigent seulement un commutateur par enroulement de phase, contrairement à ce qui se passe dans la majorité des moteurs à courant alternatif exigeant au moins deux commutateurs par phase.

Ici, chaque bras du convertisseur de la GRV a deux IGBT et deux diodes.

III.3.2. CONVERTISSEUR DE LA GRV

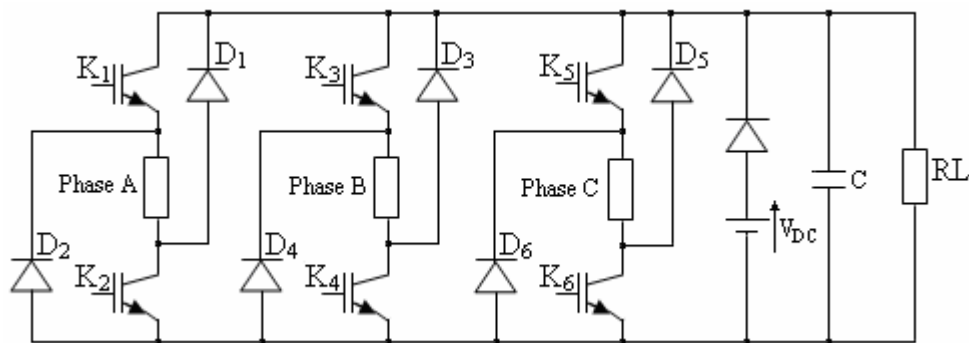


Fig.III.5 Convertisseur triphasé asymétrique pont-H

III.4. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA GRV

III.4.1 OBJECTIF

La fermeture des interrupteurs du convertisseur (diodes bloquées) doit être effectuée durant la décroissance de l'inductance, ce qui produit une tension $(+V_{DC})$ à la sortie du convertisseur : cette phase est appelée « *phase de magnétisation de la GRV* ». Pendant la croissance de l'inductance seules les diodes conduisent (interrupteurs ouverts), la tension de sortie devient $(-V_{DC})$: cette phase est appelée « *phase de génération de la GRV* ».

En conséquence, le convertisseur délivre une tension en créneaux variant entre $+V_{DC}$ et $-V_{DC}$. Ainsi, l'objectif de la commande est de faire conduire les IGBT seulement pendant la phase de magnétisation (décroissance de l'inductance), comme illustré dans la figure (III.6). En réalité, on insiste à ce que la magnétisation de la machine soit faite lors de la décroissance de l'inductance pour la raison suivante : pour que le couple soit négatif (car il s'agit d'une génératrice), il faut que la dérivée de l'inductance soit négative en vertu de l'équation (III-14).

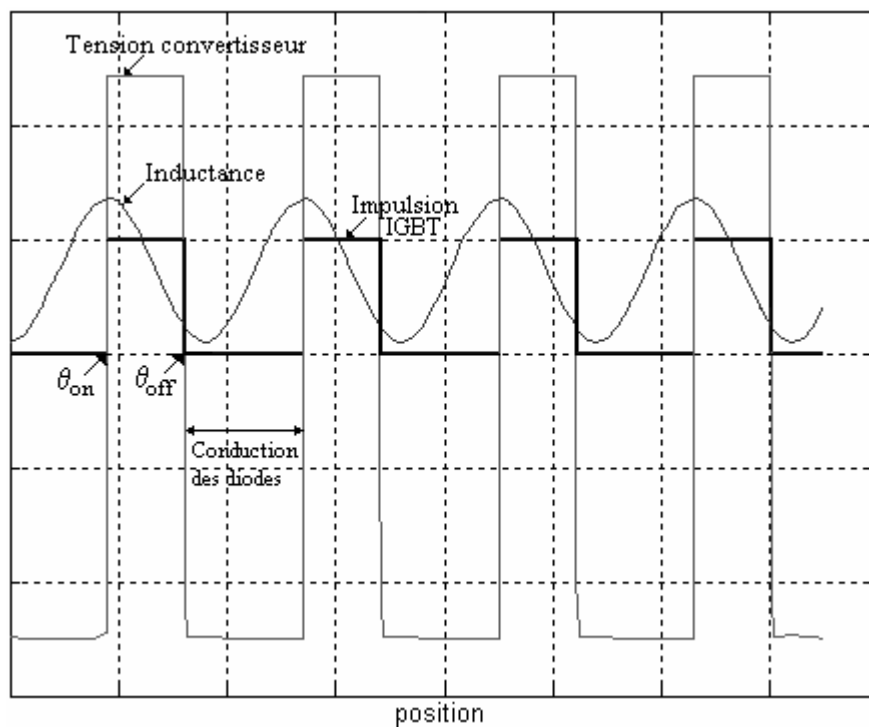


Fig.III.6 Conduction des IGBT pendant la décroissance de l'inductance

III.4.2 SCHEMA SYNOPTIQUE

Le schéma synoptique du circuit de commande monophasé permettant d’atteindre l’objectif précédent est représenté (Fig. III.7). D’abord, le courant d’une phase statorique est capturé ; ensuite, il est comparé à une consigne. Après, l’erreur Δi passe par un comparateur à hystérésis générant une sortie logique (0 ou 1). Puis, cette dernière intervient avec la position du rotor pour établir l’ordre de commutation (impulsion).

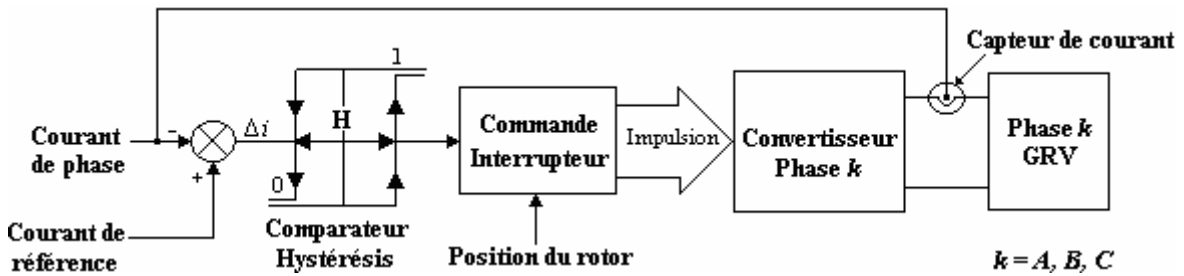


Fig.III.7. Schéma synoptique du circuit de commande proposé

III.5 STRATEGIE DE LA COMMANDE PAR HYSTERESIS

Stratégie de commande en courant

Cette méthode de contrôle des courants, la plus utilisée dans l’industrie actuellement, consiste à commander les interrupteurs de l’onduleur de telle sorte que les courants des phases statoriques du moteur ne puissent évoluer en dehors d’une bande de largeur **H** encadrant leurs courbes de référence. Ce contrôle se fait donc par une comparaison permanente entre les courants réels et leurs consignes. La différence entre les deux valeurs permet à la logique de commande de l’onduleur d’imposer une commutation des interrupteurs à chaque fois que cette différence dépasse, en valeur absolue, **H/2** (Fig.III.8). Cette méthode ne nécessite donc pas la connaissance du modèle électrique de la machine [62].

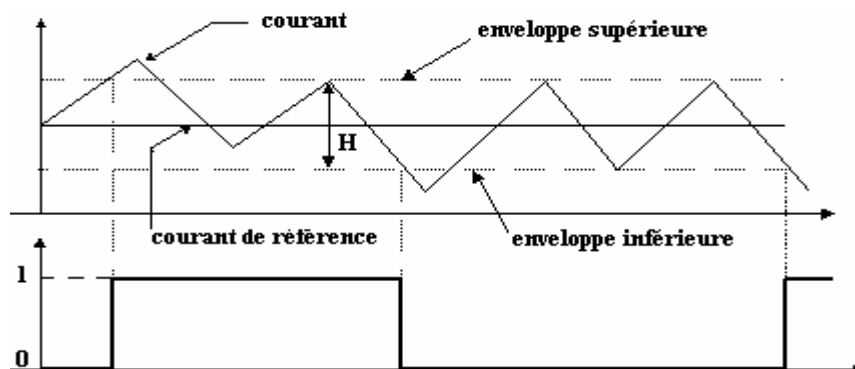


Fig.III.8 Principe du contrôle par hystérésis

Comme il est bien connu, cette technique de contrôle du courant la plus directe que l'on puisse imaginer, a les avantages d'une bonne stabilité, une réponse très rapide et une bonne précision [63].

III.6. SIMULATION D'UNE GRV 6/4

Avant de commencer la simulation de la GRV en utilisant son modèle non linéaire, il est nécessaire de bien choisir la position initiale du rotor qui ne doit pas être dans la zone où l'inductance L a une valeur constante car le couple serait nul. Quand le couple résistant de la charge est nul, la variable θ , correspondant à la position du rotor, n'évolue pas et la machine serait arrêtée tout le temps. Pour notre machine particulière, un angle initial θ été choisi, pour éviter ce cas de couple de charge nul.

III.6.1 PARAMETRES UTILISES POUR LA SIMULATION DE LA GRV

La machine à réluctance variable simulée avec le modèle mathématique non linéaire établi ci-dessus est une génératrice triphasée dont la simulation numérique a été réalisée avec *SIMULINK* sous environnement *MATLAB* (version 6.5). Les angles optimaux des interrupteurs sont limités comme suit : $45^\circ \leq \theta_{on} < \theta_{off} \leq 90^\circ$

Les paramètres de la simulation sont précisés dans le Tableau III.1.

Tab.III.1 Paramètres de la simulation de la GRV.

Paramètre	Valeur Numérique
N_s	6
N_r	4
θ_{on}	45°
θ_{off}	80°
R	0.25Ω
L_{min}	0.01 H
$V_{excitation}$	250 V
K_p, K_i	10, 5
R_{DC}	1140Ω
<i>Vitesse d'entraînement</i>	90000 rad/s
<i>Angle de référence</i>	10°

III.6.2 DESCRIPTION DU MODELE ELABORE SOUS MATLAB/SIMULINK

La figure (III.9) représente le modèle complet de simulation d'une GRV 6/4.

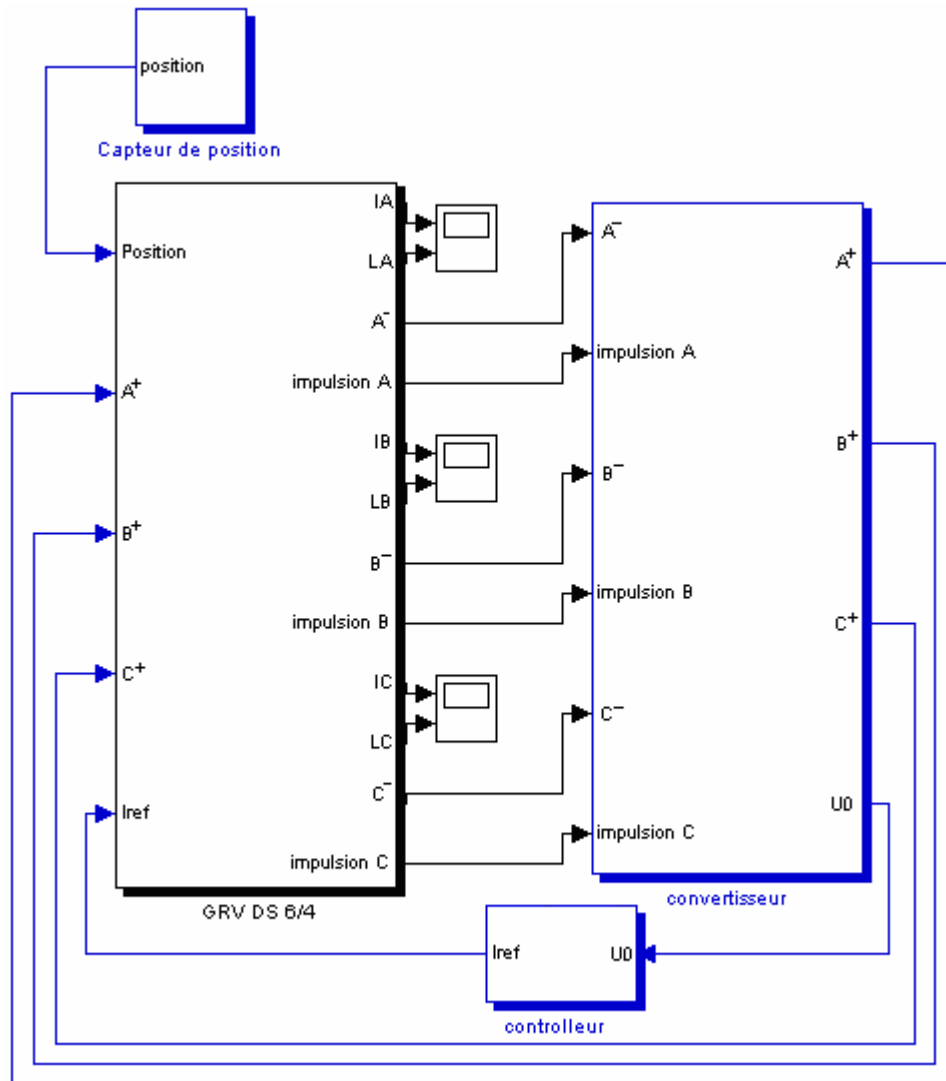


Fig.III.9. Modèle du système GRV- convertisseur-contrôleur-capteur simulé sous *Matlab/Simulink*.

Comme mentionné dans la figure ci-dessus, le modèle complet de simulation se compose de cinq blocs principaux : la GRV, le convertisseur de puissance, le bus continu, le contrôleur et le capteur de position. Dans ce qui suit, nous détaillerons le contenu et la fonction de chaque bloc.

III.6.2.1 Bloc GRV

La structure interne du bloc GRV 6/4 est illustrée (Fig. III.10). La GRV contient trois sous-systèmes notés Phase A, Phase B et Phase C. Ces derniers ont pour vocation d'une part, de produire les impulsions nécessaires pour commander les interrupteurs (type IGBT) du

convertisseur, et d'autre part, de permettre l'échange de puissance entre le stator de la machine et les phases du convertisseur. Chacun de ces trois blocs est décrit par trois entrées : la phase correspondante, l'angle du rotor donné par le capteur de position et la référence du courant calculée par le contrôleur.

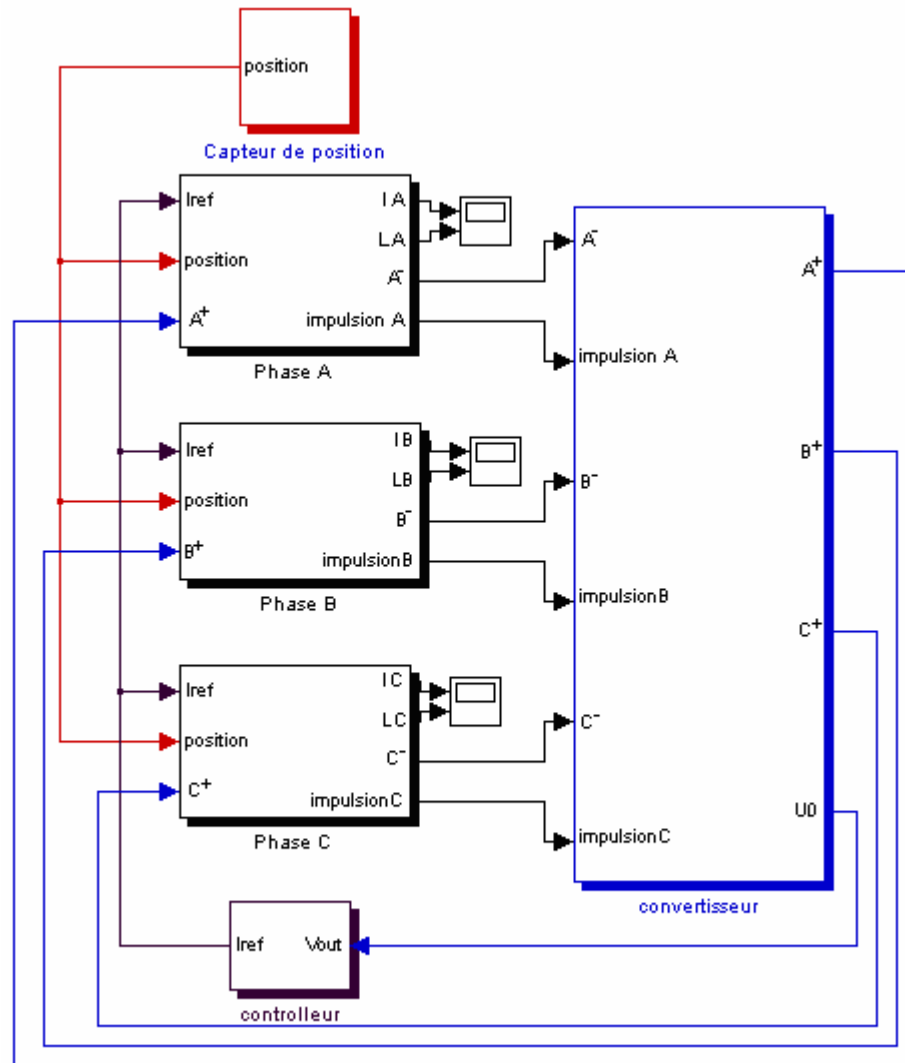


Fig.III.10 Structure interne du bloc GRV.

Dans la Fig. III.11, nous détaillons le contenu du bloc de la Phase A, les 02 autres blocs étant identiques mais différents juste au niveau de la valeur du décalage angulaire où on prend 0° pour la phase A, θ_s pour la phase B, et $2\theta_s$ pour la phase C, tel que [26]:

$$\theta_s = 2\pi (1/N_r - 1/N_s) \quad \text{(III-15)}$$

Dans ce bloc, nous pouvons également calculer l'inductance d'une phase en appliquant les formules (III-6) à (III-9), avec $L_{min} = 0.01H$.

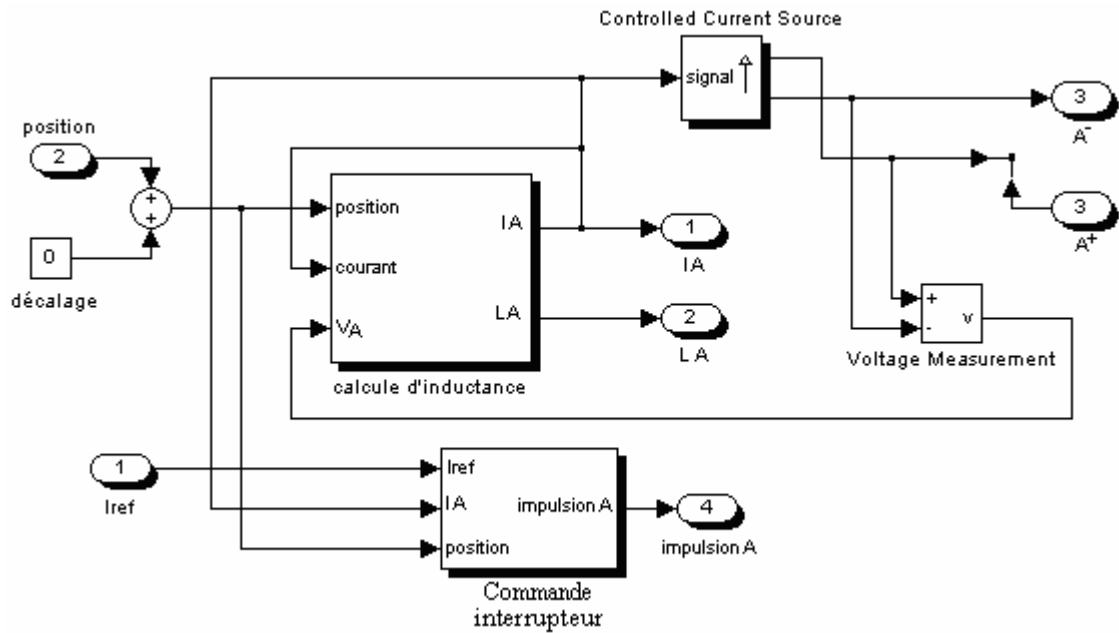


Fig.III.11 Intérieur du bloc Phase A.

De plus, en observant le contenu du bloc de calcul de l'inductance (Fig.III.12), nous pouvons assimiler la méthode de calcul du courant (formule (III-1)).

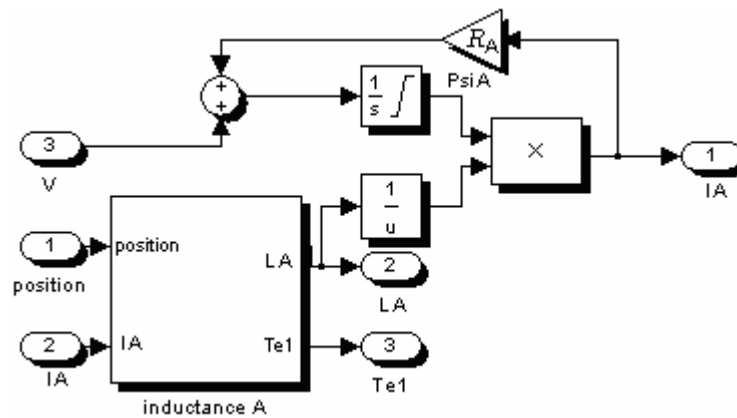


Fig.III.12 Calcul du courant d'une phase en vertu de la formule (III-1).

Remarques :

- La conversion d'angle est une fonction « modulo », puisque chaque inductance de phase a une périodicité de $2\pi/N_r$ avec $N_r = 4$; il est approprié de transformer l'angle de position de rotor venant du capteur de position, de sorte que ça soit le modulo $2\pi/N_r$.
- Le bloc *Controlled Current Source* qui apparaît dans la figure (III.11) convertit le signal courant en une source commandée de courant ; ses sorties sont reliées aux bornes d'un enroulement statorique (k^+ , k^-) où k est l'indice de phase.
- Le bloc *Voltage Measurement* est un bloc de mesure de la tension ; il convertit la source de tension fournie par le convertisseur de puissance en un signal de tension et sa sortie est l'entrée 3 qui apparaît dans la figure (III.12), que nous avons utilisée pour le calcul du courant.

III.6.2.2 Bloc Convertisseur de puissance

(a) Circuit de puissance

Comme il a été mentionné précédemment, la structure du convertisseur de puissance est un demi-pont triphasé asymétrique (Fig.III.5).

Puisque les trois phases du convertisseur sont symétriques, on se contente de représenter (Fig.III.13) uniquement la phase A.

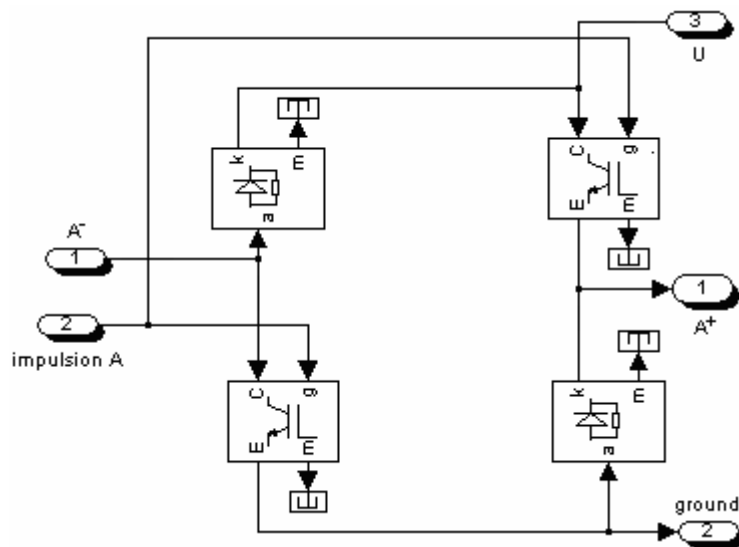


Fig.III.13 Circuit de puissance du convertisseur.

Les phases de la GRV sont indépendantes et, en cas d'une anomalie dans un enroulement, le fonctionnement non interrompu est possible.

III.6.2.3 Bloc Bus Continu

La figure (III.14) montre le bloc du bus continu. Il est constitué d'une source continue avec laquelle on place en série une diode. Le rôle de cette diode est de prévenir le courant généré par la GRV (pendant la phase de génération) de retourner vers la source continue. Une capacité (C_{DC}) est reliée en parallèle avec la sortie du convertisseur de puissance ; elle sert pour le filtrage du système. Nous avons aussi représenté le circuit de charge dans cette Figure (charge résistive) ; le transistor IGBT placé en série est utilisé pour simuler une présence (essai en charge) et une absence de charge (essai à vide).

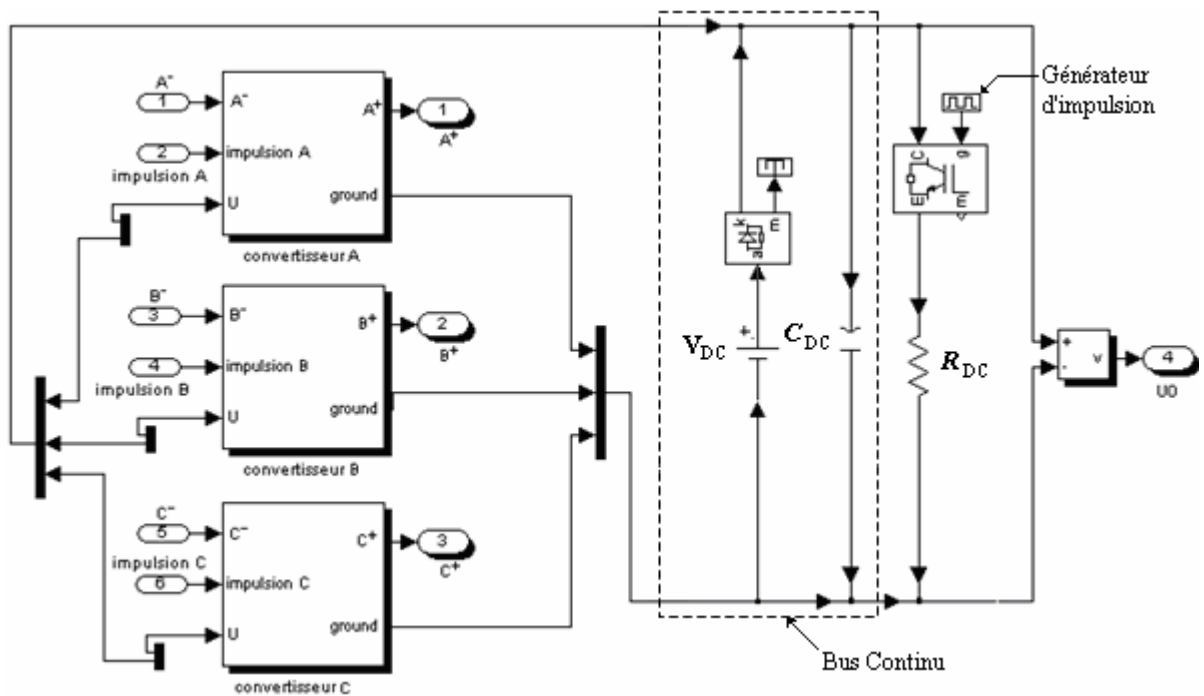


Fig.III.14 Convertisseur, bus continu et charge

III.6.2.4 Le Contrôleur (Fig. III.15)

Selon la tension de sortie du système et la tension de référence choisie, le contrôleur génère le courant de référence de la boucle du courant pour chaque phase afin de mettre en application la commande des deux boucles fermées.

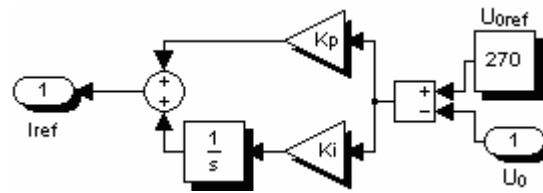


Fig.III.15 Le contrôleur

III.6.2.5 Capteur de position (Fig. III.16)

Le capteur de position est sensé capter la position du rotor de la GRV, son schéma-bloc est représenté (Fig.III.16). La vitesse est mesurée puis intégrée ; il en résulte un angle qui sera additionné à un certain angle de référence. Ainsi, on obtient la position θ du rotor.

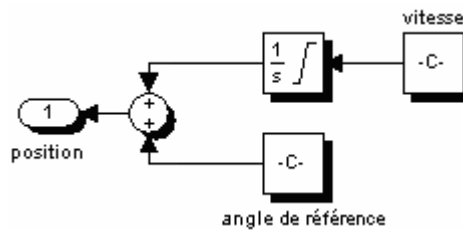


Fig.III.16 Capteur de position.

III.6.3 RESULTATS DE SIMULATION DE LA GRV

Les figures suivantes illustrent les principaux résultats de simulation.

La figure (III.17) montre la tension constante de la source continue ($V_{DC}=250$ V).

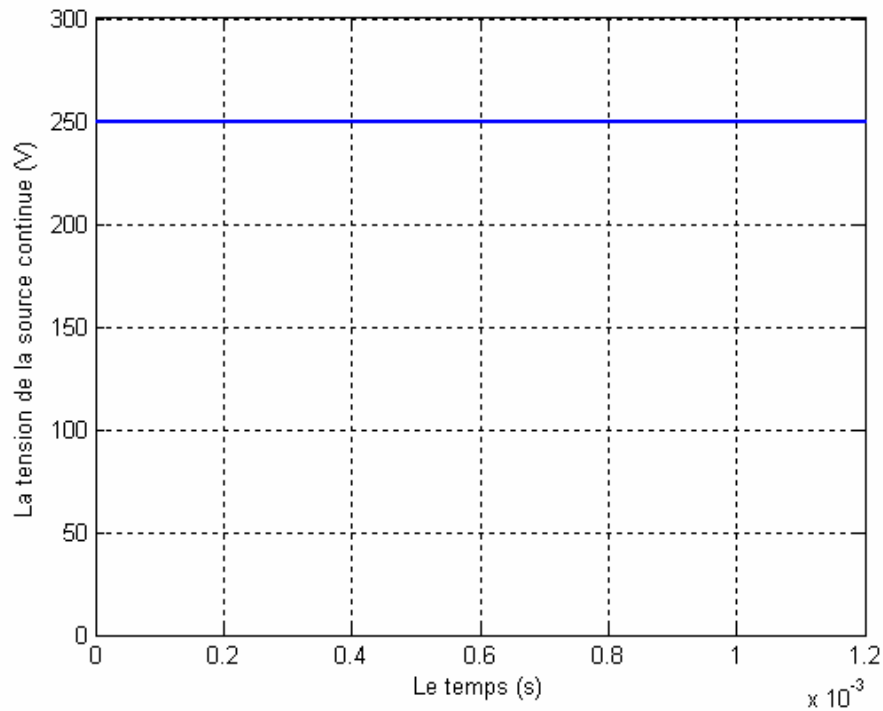


Fig. III.17 La tension de la source continue

La Fig.III.18 montre la tension du côté AC du convertisseur de puissance (phase A). C'est une tension alternative variant entre $-V_{DC}$ (-250V) et $+V_{DC}$ (+250V). Le niveau +250 V est obtenu lors de la conduction des IGBT K_1 et K_2 (phase de magnétisation), tandis que le niveau -250 V est obtenu lors de la conduction des diodes D_1 et D_2 (phase de génération).

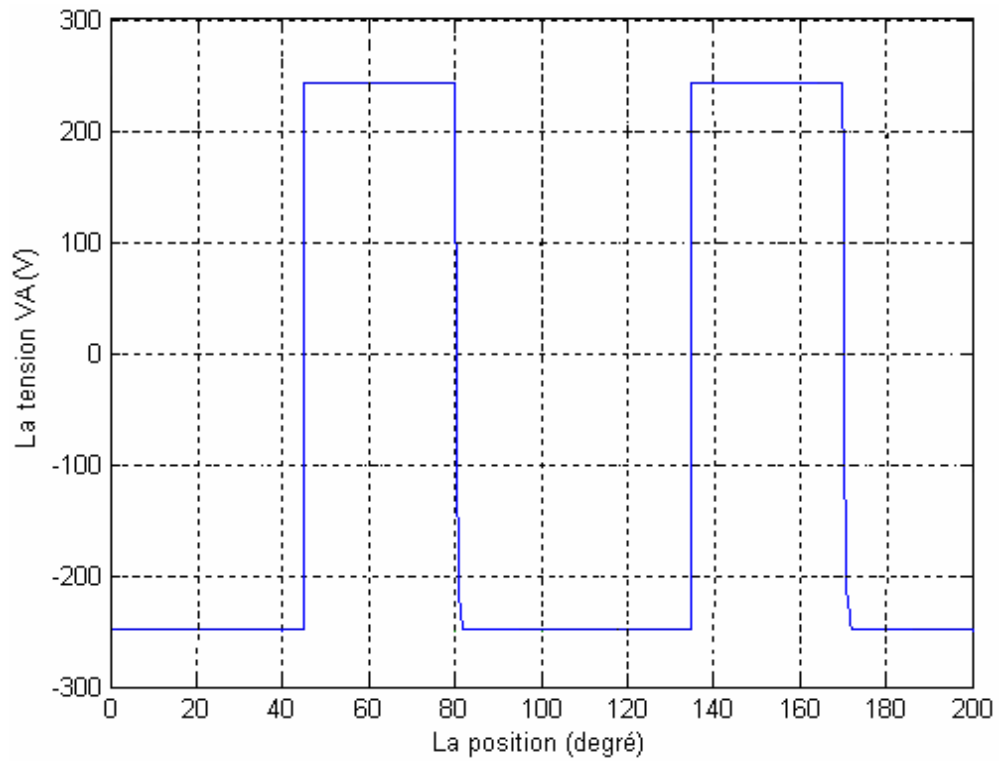


Fig.III.18 La tension de la phase A

Dans la Fig.III.19, on montre les tensions alternatives dans les trois phases. La tension de la phase B est décalée de celle de la phase A d'un angle θ_s et quant à celle de la phase C, elle est décalée de $2\theta_s$.

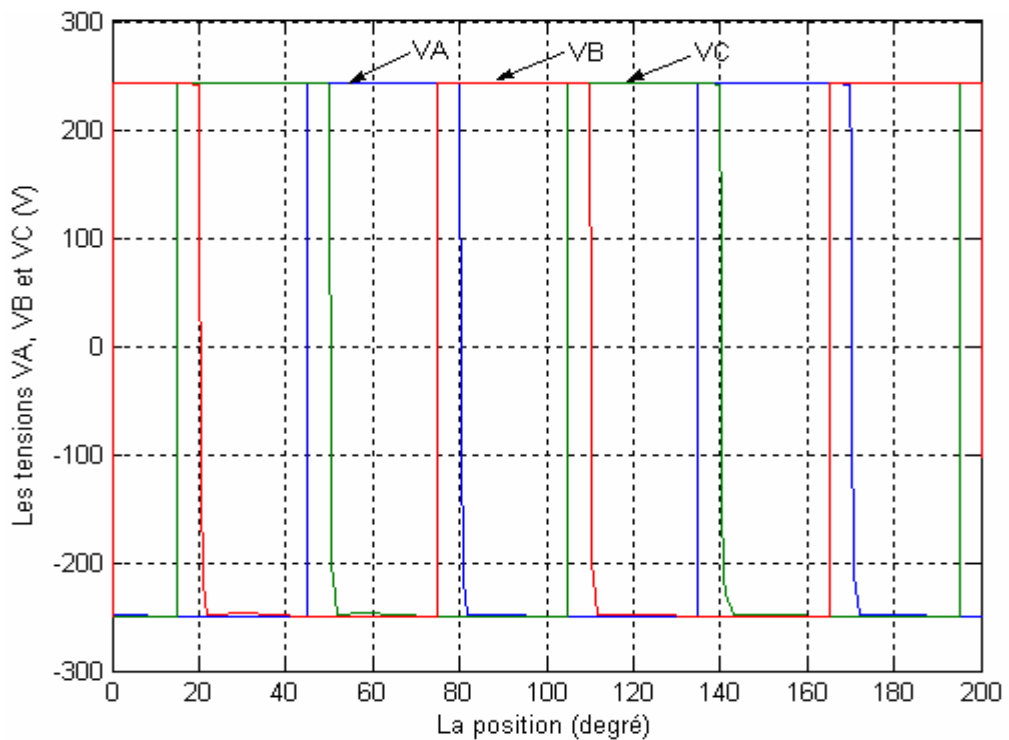


Fig.III.19 Les tensions des trois phases

La Fig.III.20 représente l'inductance en fonction de la position du rotor. On observe des valeurs strictement positives tantôt croissantes, tantôt décroissantes. Cela est justifié par la double saillance de la machine (saillance au stator et au rotor). Pour la machine considérée, et pour des positions variant de 0° à 100° , la valeur maximale de l'inductance est de 0.136 H.

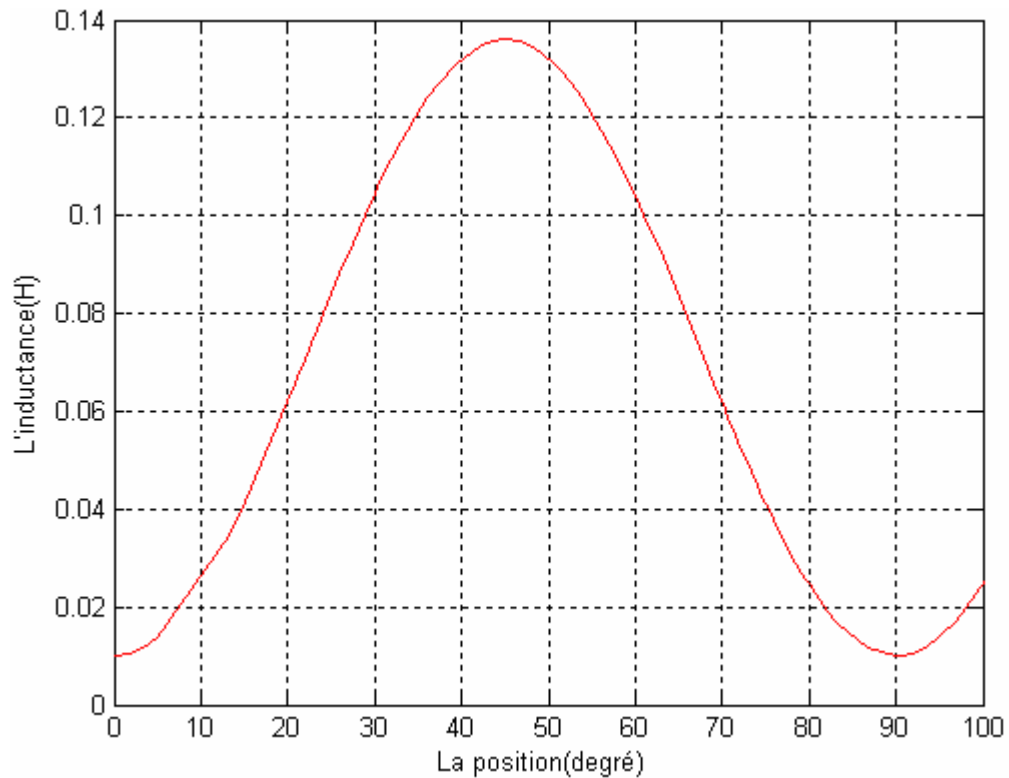


Fig.III.20 L'inductance de la phase A

Dans la Fig.III.21, on montre les inductances dans les trois phases. Rappelons que l'inductance de la phase B est décalée de celle de la phase A d'un angle $\theta_s=30^\circ$, et quant à celle de la phase C elle est décalée de $2\theta_s=60^\circ$.

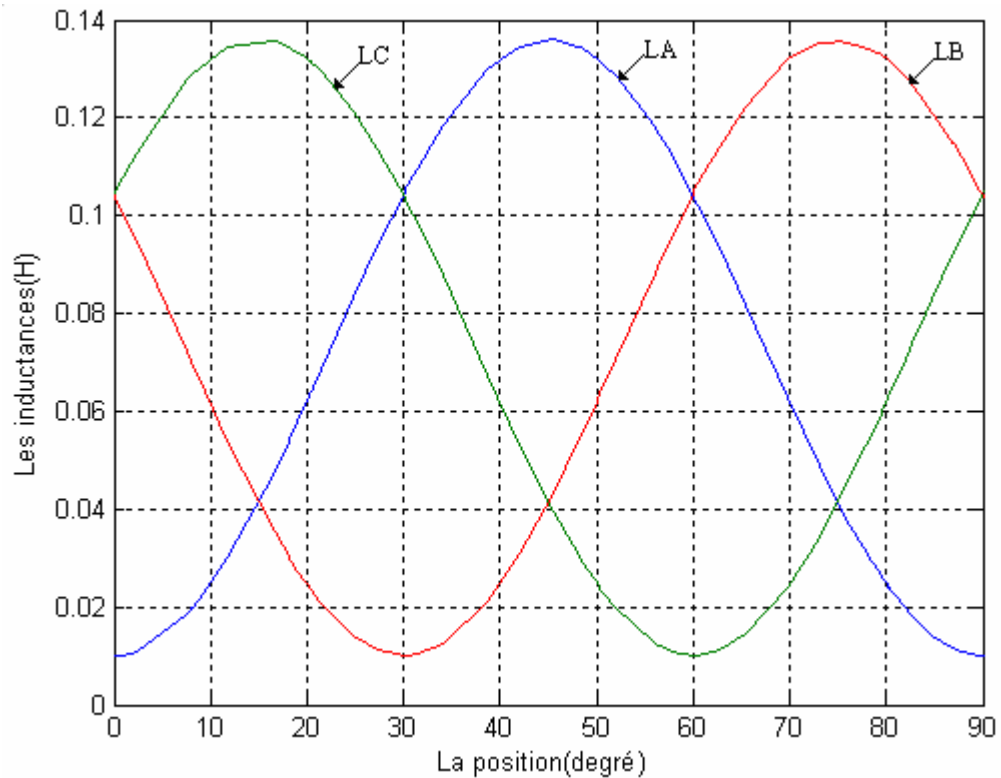


Fig.III.21 Les inductances des trois phases

Dans la Fig.III.22 on illustre l'allure du courant statorique de la machine (phase A). Le courant croît jusqu'à un maximum de 1.18A, décroît et s'annule, puis croît de nouveau. L'allure est semblable à celle qu'on a l'habitude de rencontrer dans la littérature [35, 60, 64, 65].

Dans la Fig.III.23, les courants des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de θ_s est enregistré entre IA et IB, et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre IA et IC. On constate que lorsque le courant s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases ; donc, la continuité du service est bien assurée.

Dans la Fig.III.24, on remarque que quand la vitesse diminue, le courant augmente : c'est un avantage de la GRV pour les basses vitesses de vent dans les applications éoliennes.

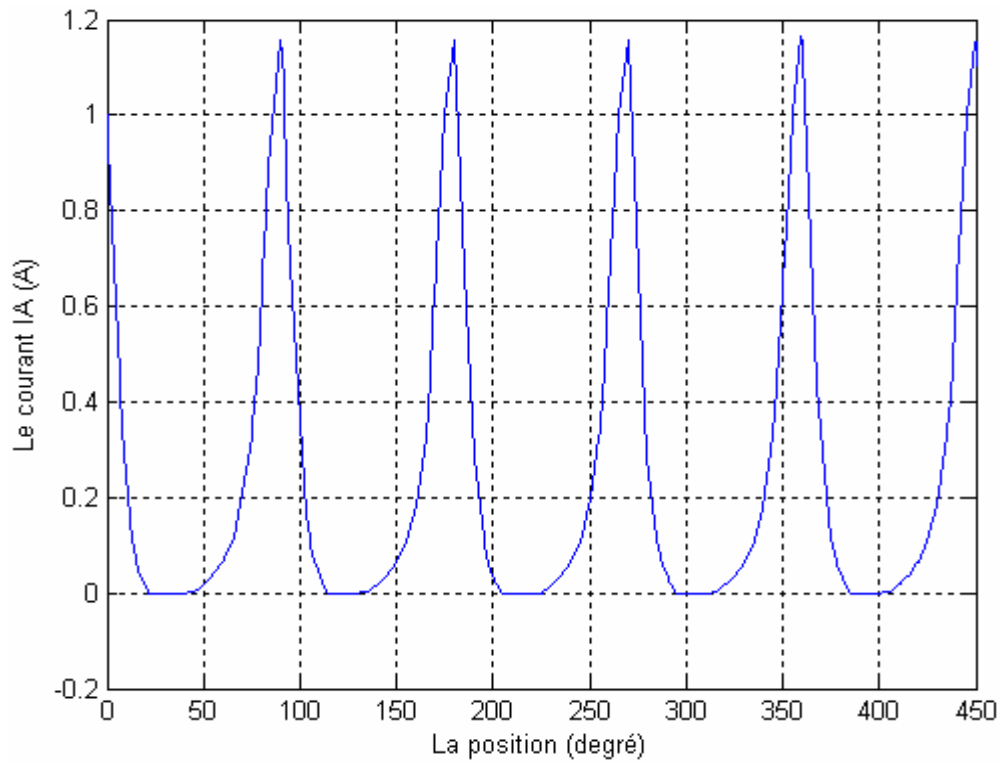


Fig.III.22 Le courant de la phase A

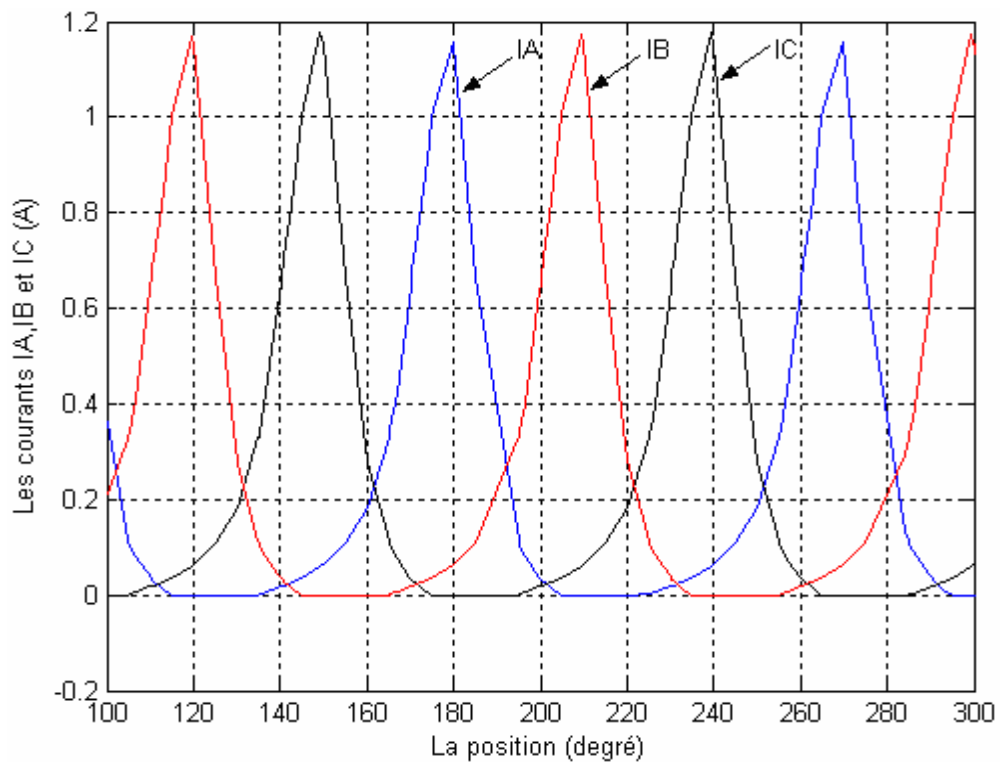


Fig.III.23 Les Courants des trois phases

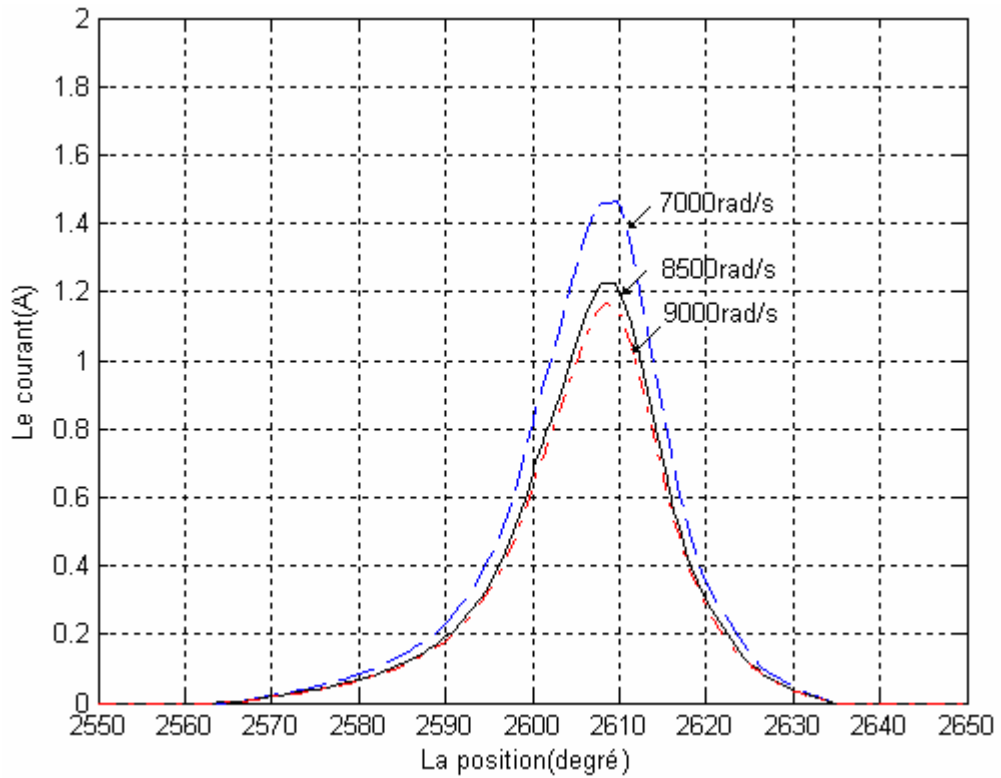


Fig.III.24 L'allure du courant de la phase A pour différentes vitesses d'excitation

La Fig.III.25 montre le courant IA pour $\theta_{on} = 45^\circ$ et différents θ_{off} .

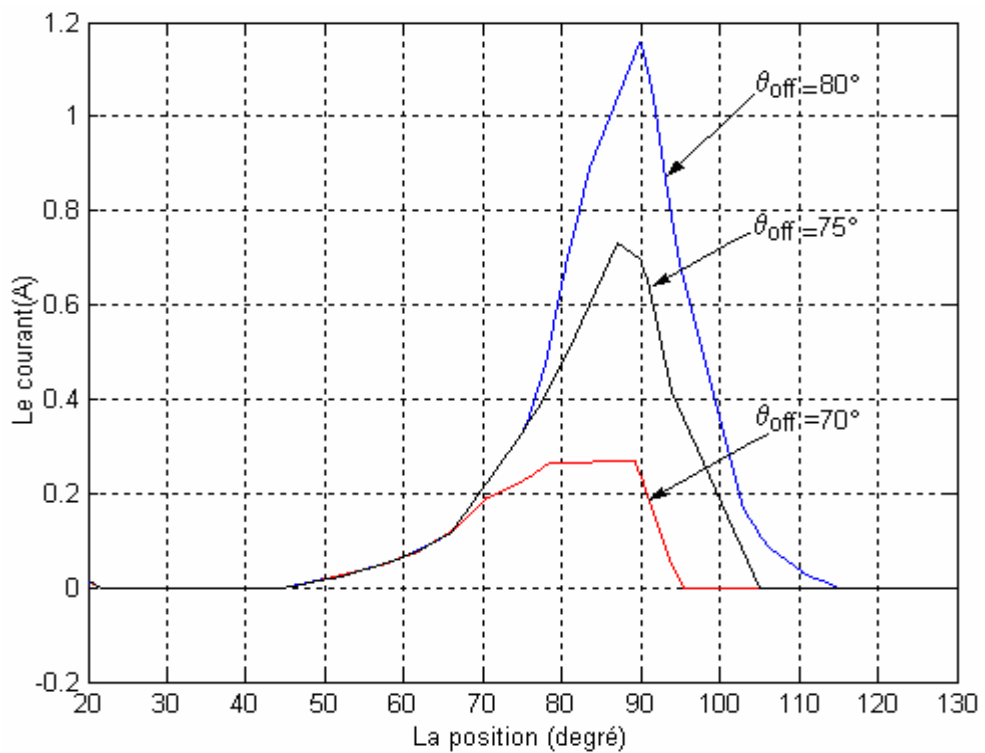


Fig.III.25 Le courant IA pour $\theta_{on} = 45^\circ$ et différents θ_{off}

La Fig.III.26 illustre les impulsions des IGBT K_1 et K_2 de la phase A du convertisseur.

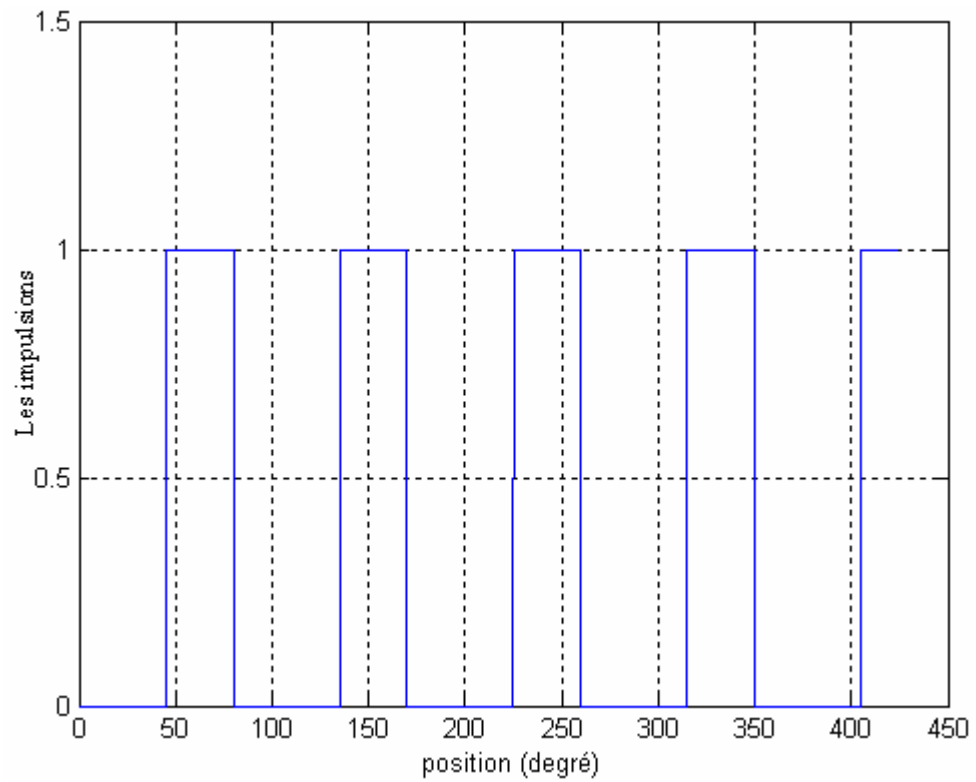


Fig.III.26 Les impulsions de la phase A

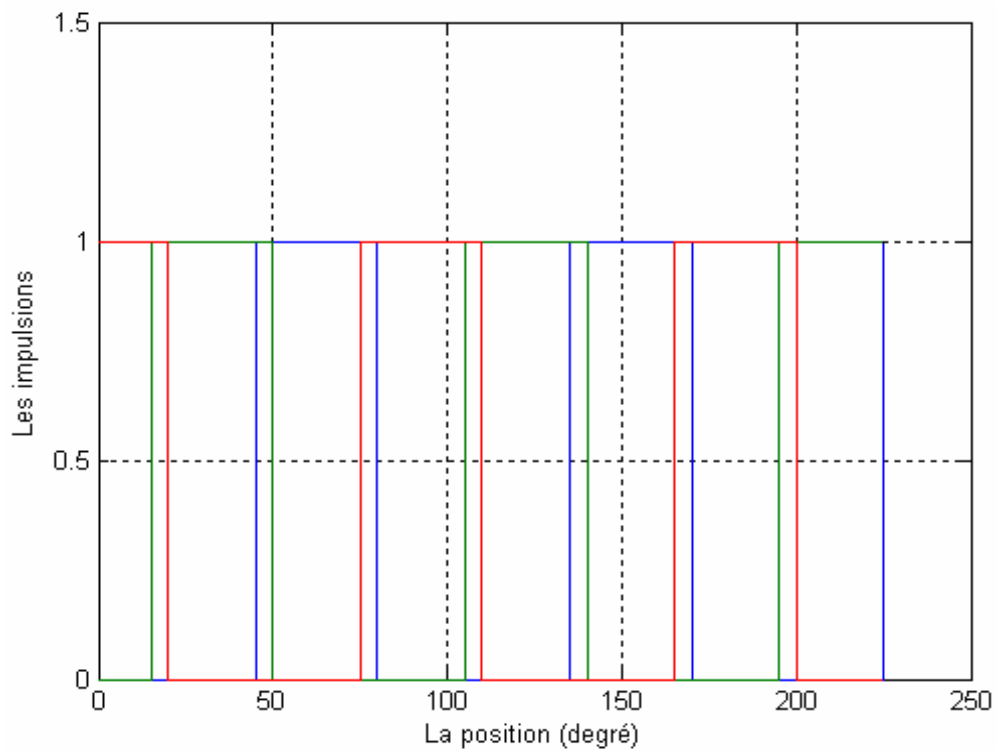


Fig.III.27 Les impulsions triphasées

Dans la Fig.III.27 précédente, on montre les impulsions des IGBT des trois phases du convertisseur. Là aussi, on remarque un décalage de θ_s entre les impulsions des phases A et B, et $2\theta_s$ entre les phases B et C (comme pour les cas des tensions, des courants et des inductances). Ce qui prouve la convergence du modèle adopté.

La Fig.III.28 représente les courbes de l'inductance et de l'impulsion de la phase A ; l'impulsion est amorcée lors de la décroissance de l'inductance.

Conformément aux tracés théoriques de la Fig.III.6, on obtient les mêmes tracés dans la Fig. III.29 où on voit clairement que la machine est excitée (magnétisée) lors de la décroissance de l'inductance.

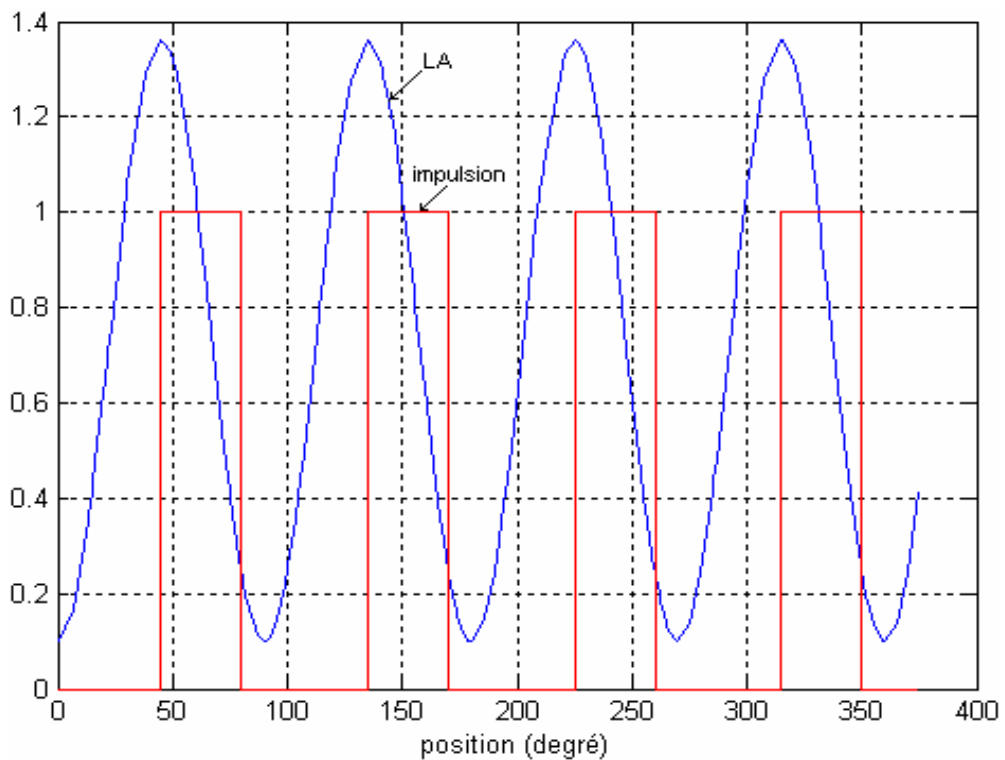


Fig.III.28 La position des impulsions par rapport à l'inductance.

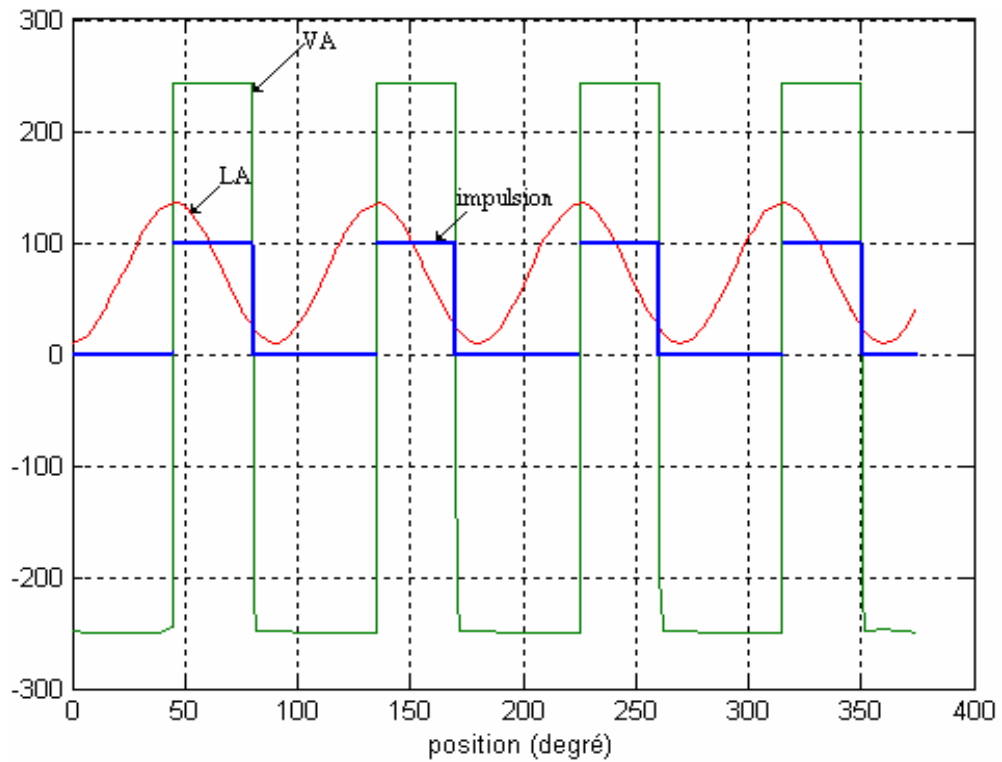


Fig.III.29 L'influence des impulsions sur la tension et l'inductance de la machine.

La Fig.III.30 illustre la variation du flux par rapport au courant qui délimite la surface du cycle de l'énergie magnétique pouvant être transformée.

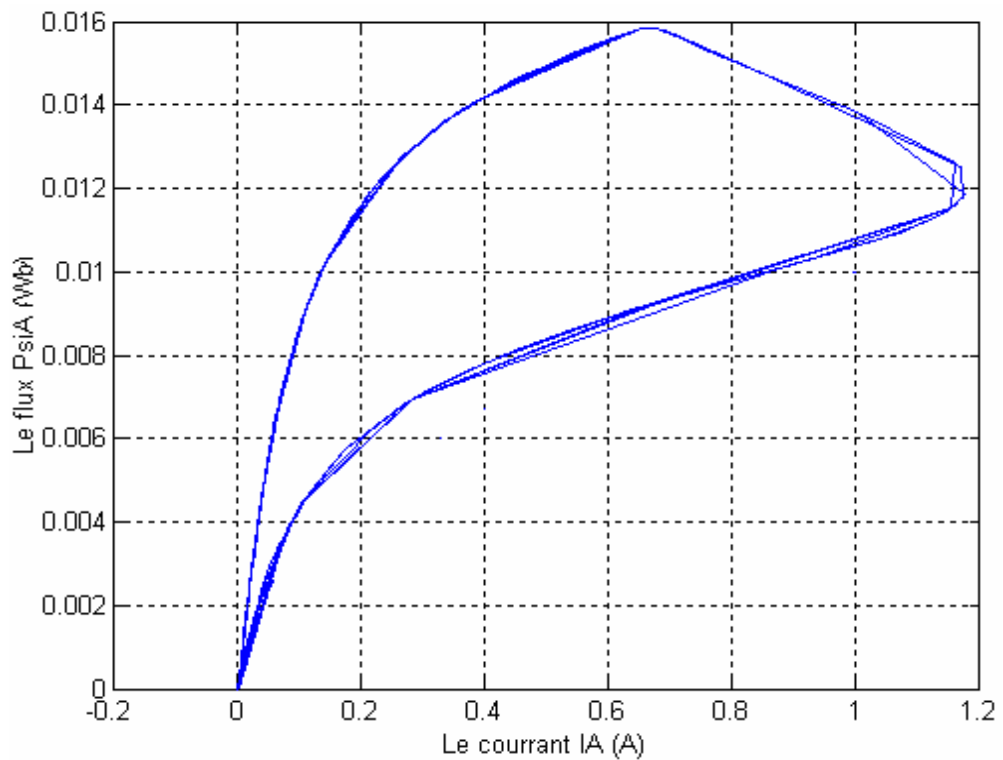


Fig.III.30 Le flux en fonction du courant (phase A).

Dans la Fig.III.31 on montre l'allure du flux statorique de la machine en fonction de la position. Le flux croit jusqu'à un maximum de 0.016Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance (comme pour le cas du courant).

La Fig.III.32 les flux des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de θ_s est enregistré entre PsiA et PsiB, et un décalage de $2\theta_s$ est relevé entre PsiA et PsiC. On constate que lorsque le flux s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases.

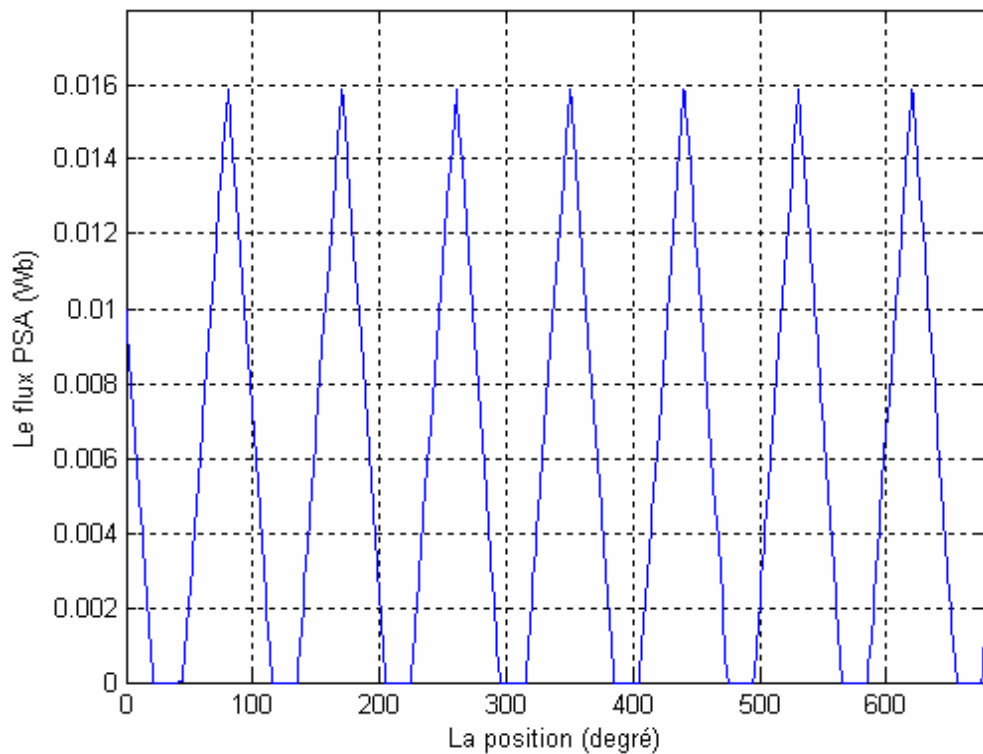


Fig.III.31 Le flux de la phase A.

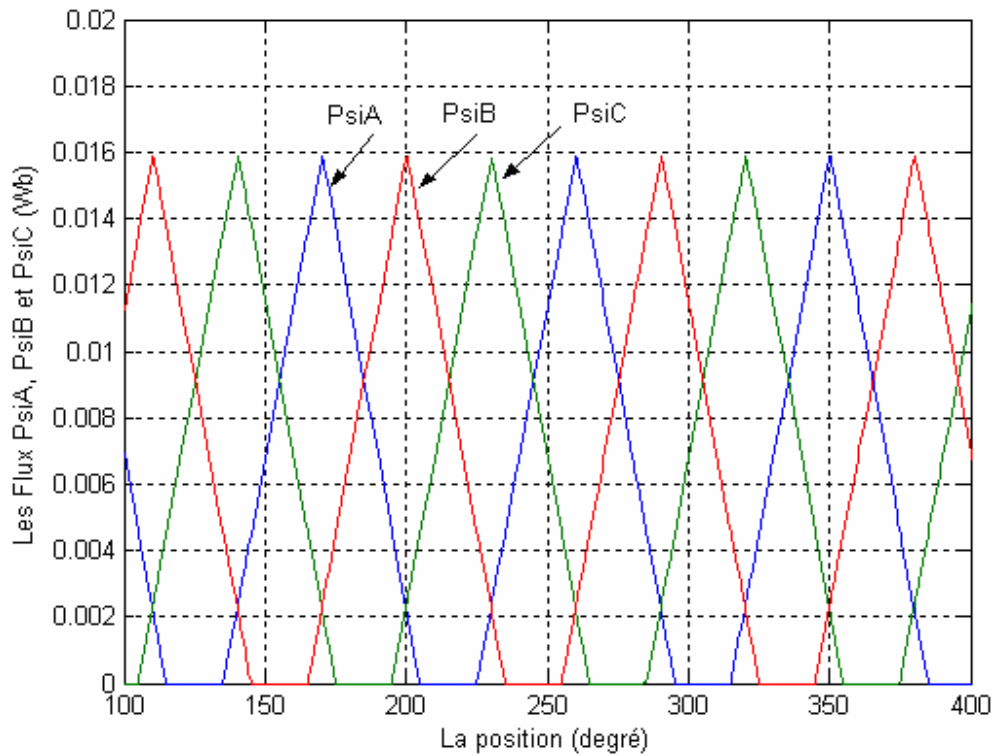


Fig.III.32 Les flux des trois phases.

Dans la Fig.III.33 on illustre l'allure du couple électromagnétique de la machine. C'est une courbe qui oscille autour d'une valeur moyenne négative (-0.01 N.m).

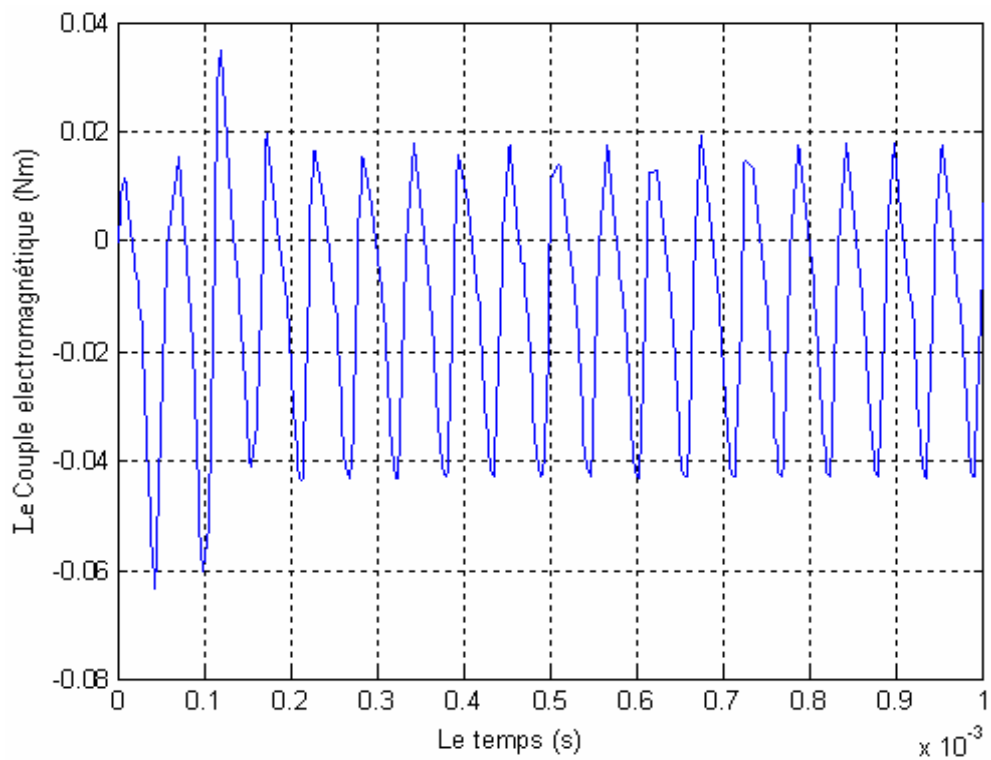


Fig.III.33 Le couple électromagnétique de la GRV.

III.7 ASSOCIATION DE LA GRV A UNE TURBINE EOLIENNE

III.7.1 DESCRIPTION GENERALE DE L'ENSEMBLE GRV-TURBINE EOLIENNE

Les réserves de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel s'épuisent avec le temps et polluent l'environnement. Il faudrait donc penser au développement et à l'utilisation d'autres énergies propres et renouvelables (*green power*). Parmi ces sources alternatives, l'énergie éolienne fait l'objet d'une application de notre système de conversion électromécanique dans cette partie (*cf.* Chapitre I).

La MRV est naturellement adaptée à la basse vitesse car la vitesse de rotation est directement liée au nombre de dents du rotor (équation III-3). La structure de la MRV dite «pure» est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator. Pour un grand nombre de dents, les dents du stator sont regroupées en plots afin de faciliter le bobinage de la machine, on obtient alors une machine à plots dentés. C'est le principal avantage de cette structure pour assurer le fonctionnement basse vitesse (grand nombre de dents) tout en conservant un bobinage réalisable en utilisant une MRV à plots dentés. La structure robuste de la GRV permet de l'utiliser dans une éolienne.

Le schéma de l'association de la GRV à une turbine éolienne est illustré dans la Fig.III.34.

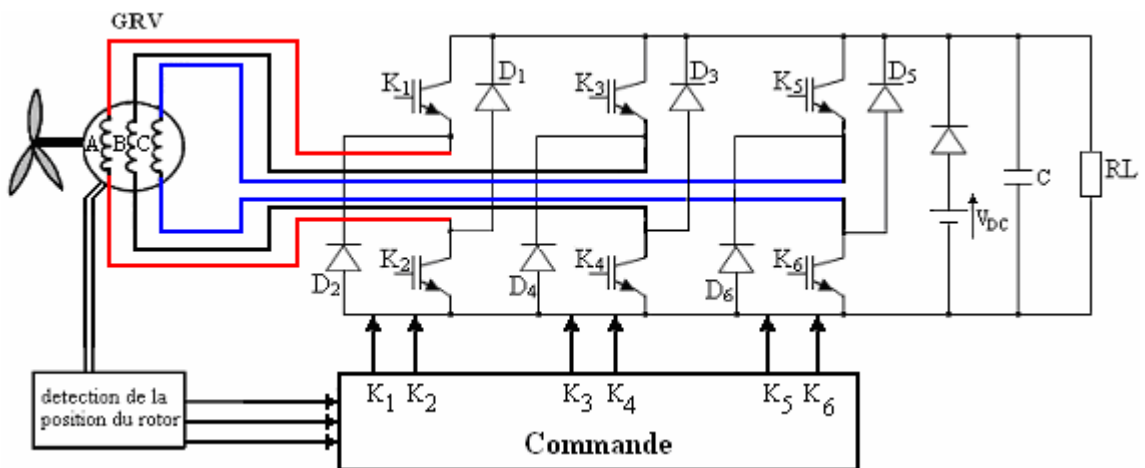


Fig.III.34 Association d'une GRV et d'une turbine éolienne.

III.7.2 MODELE DE SIMULATION

La Fig.III.35 représente le modèle global de simulation du bloc GRV-Turbine.

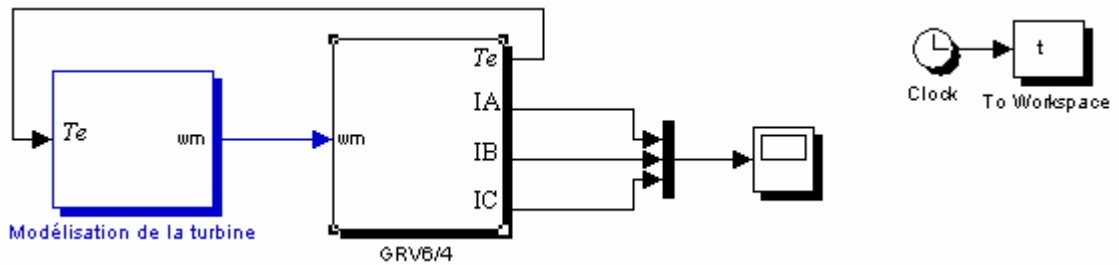


Fig.III.35 Modèle de simulation de l'association GRV-Turbine éolienne.

Le modèle de la turbine éolienne est schématisé Fig.III.36.

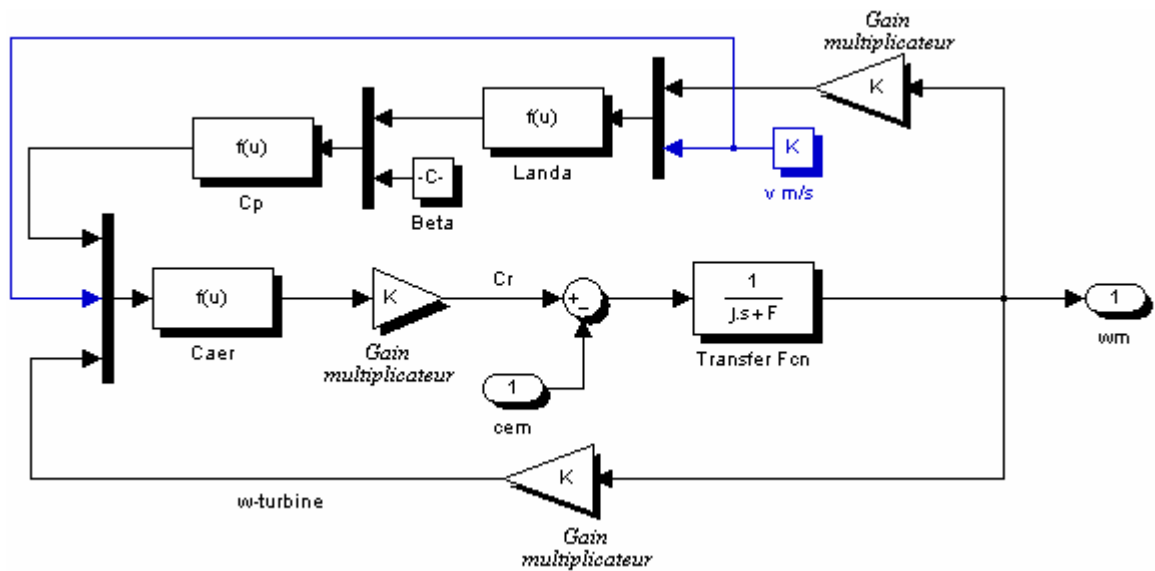


Fig.III.36 Modèle de la turbine.

Les paramètres de simulation de cette association sont inscrits dans le Tableau III.2.

Tab.III.2 Paramètres de simulation de l'association GRV-turbine

Paramètre	Valeur Numérique
J	0.01 kg.m ²
F	0.0024 N.m.s
Beta (pitch angle)	2°
Vitesse du vent	8 m/s
G	90

III.7.3 RESULTATS DE SIMULATION

Pour la simulation de l'association GRV-turbine éolienne, on a considéré deux cas : le cas où la vitesse de la turbine est fixée, et le cas où elle est fonction du temps.

III.7.3.1 Turbine à vitesse fixe

Pour une valeur fixée de la vitesse du vent, soit $V = 8$ m/s, la vitesse de rotation de la turbine en rad/s est représentée dans la Fig.III.37. Après une phase transitoire de 0.6 s, la vitesse se maintient à un niveau constant soit 980 rad/s.

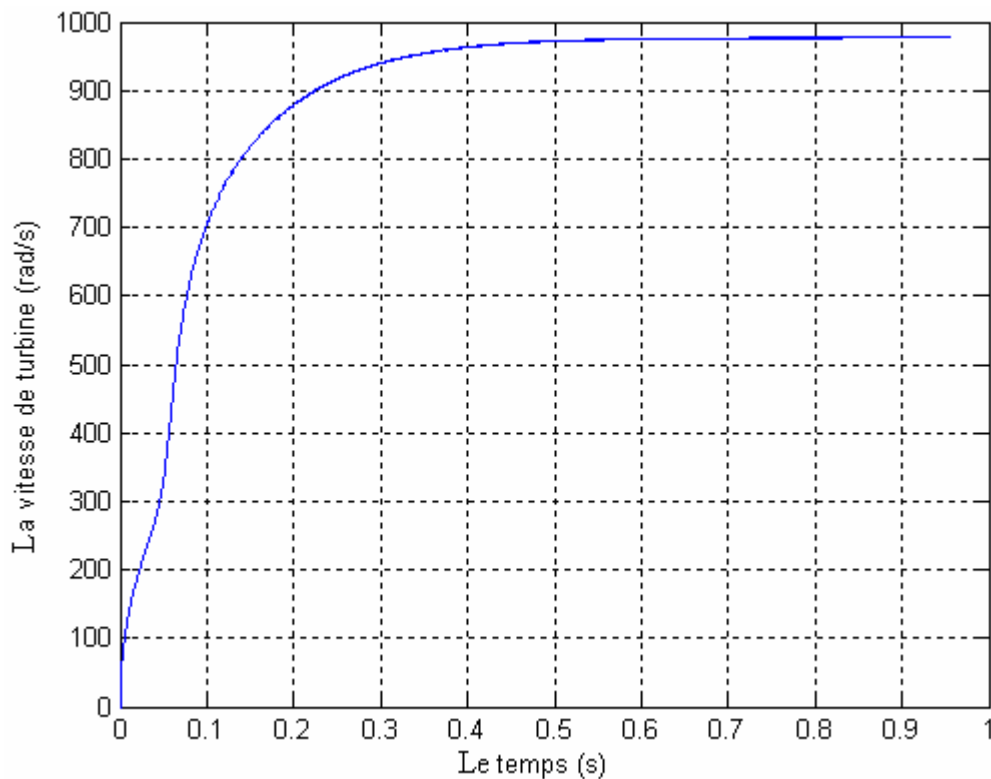


Fig.III.37 Vitesse de la turbine.

Dans la Fig.III.38, on montre l'allure du courant de la phase A du stator de la machine. C'est un courant d'une valeur maximale de 11.5 A.

Dans la Fig.III.39, on illustre les courants triphasés où les décalages respectifs de θ_s et $2\theta_s$ apparaissent de nouveau.

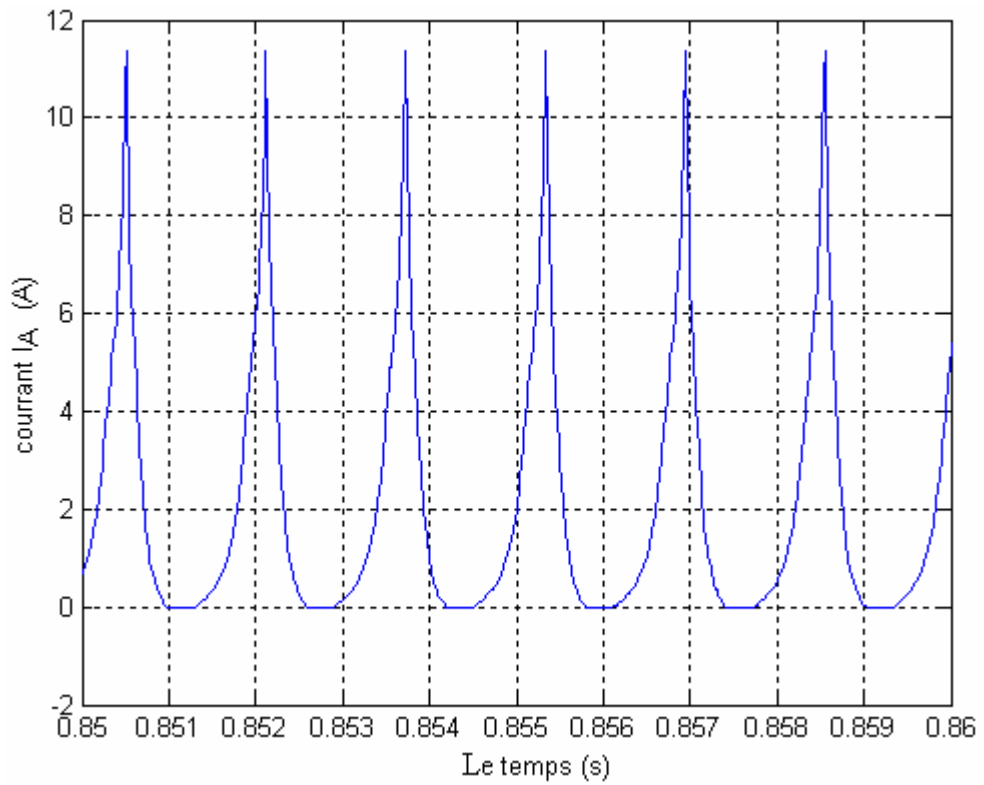


Fig.III.38 Le courant de la phase A.

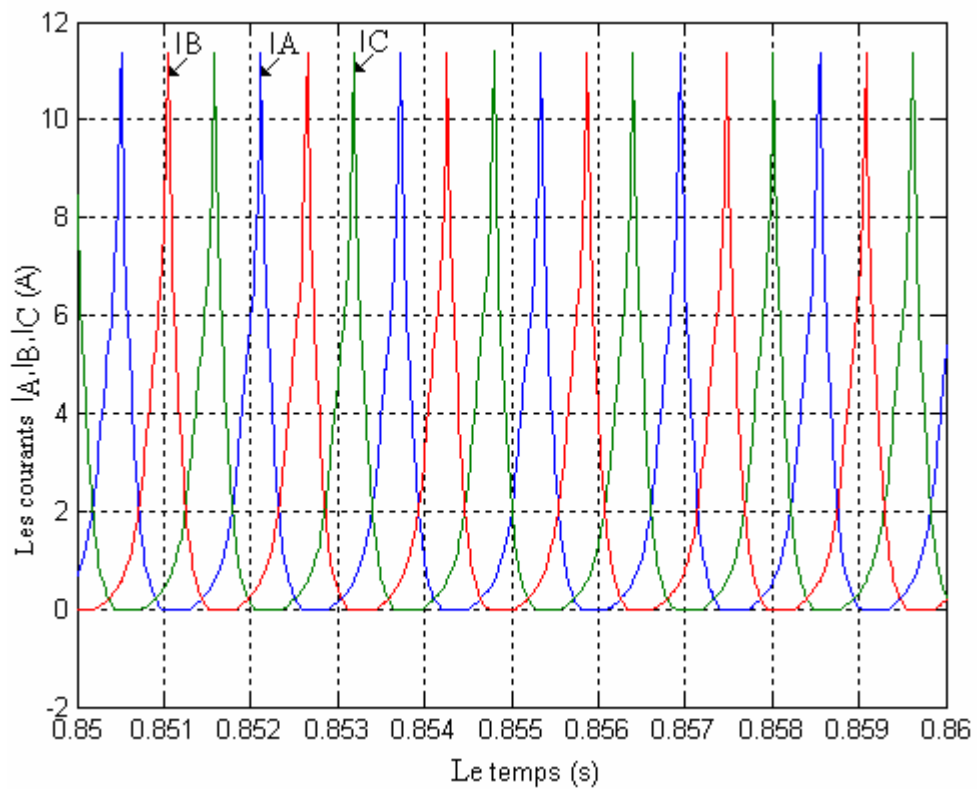


Fig.III.39 Les courants des trois phases.

III.7.3.2 Turbine à vitesse variable

Dans ce cas, on a emprunté à la référence [62] l'expression de la vitesse du vent en fonction du temps

$$V(t) = 10 + 0.2.\sin(14,7.t) + 2.\sin(26,65.t) + \sin(129,3.t) + 0.2.\sin(366,45.t) \quad (\text{III-16})$$

Alors, la nouvelle allure de la vitesse de la turbine est indiquée Fig.III.40. Après un régime transitoire de 0.6 s, la courbe devient fluctuante autour de 1050 rad/s; donc, la vitesse a augmenté. Ainsi, on s'attend à une diminution au niveau du courant statorique. En effet, comme illustré dans les figures (III.41) et (III.42), le courant a été réduit et l'on enregistre une valeur maximale de 10.5 A. On précise ici que la Fig.III.42 est un agrandissement (zoom) d'une portion de la courbe de la Fig.III.41.

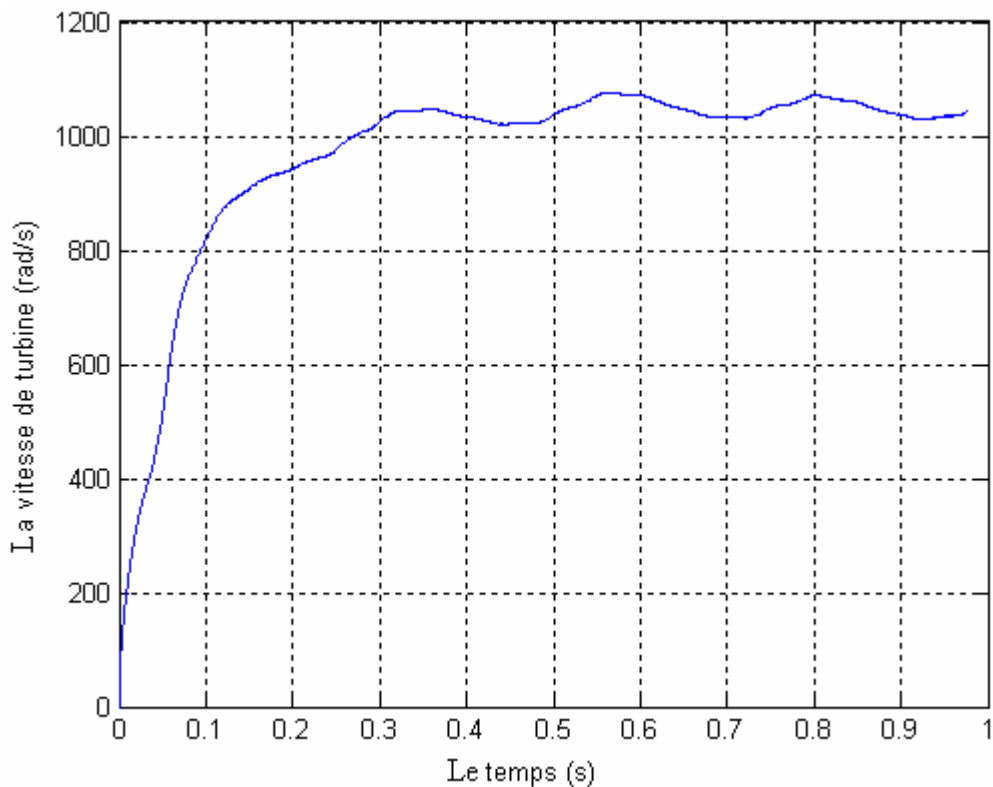


Fig.III.40 La vitesse de la turbine.

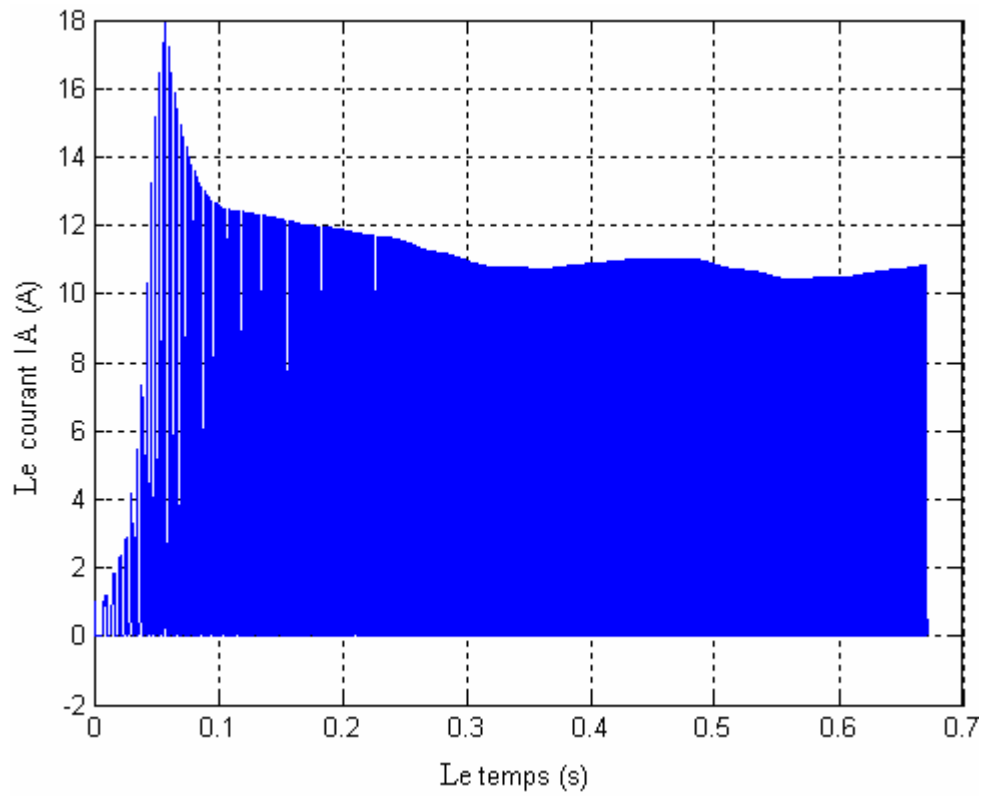


Fig.III.41 Le courant de la phase A

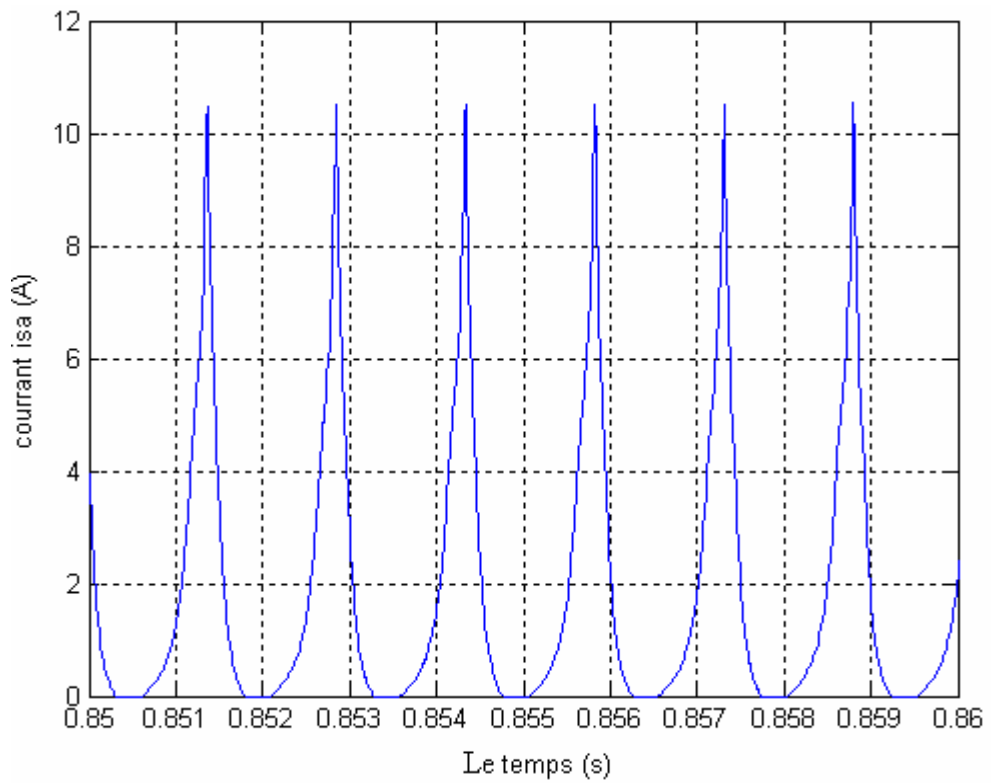


Fig.III.42 Zoom d'une portion de la courbe de la Fig.III.43.

III.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait la description et la discussion détaillée de la modélisation et la simulation de la machine à réluctance variable en mode générateur.

Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique de la GRV. Nous avons aussi étudié l'influence de la variation de vitesse sur le courant statorique : une diminution de la vitesse engendre un accroissement au niveau du courant. Nous avons en outre montré que ce courant est aussi influencé par la durée de conduction des interrupteurs: pour une durée de conduction suffisante, le courant prend des valeurs importantes.

L'association de la GRV étudiée a révélé un avantage très important de ce type de machine : la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent, utilisant une GRV, ne nécessite pas des vitesses élevées du vent contrairement à d'autres systèmes qui exigent une vitesse élevée.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

La Machine à Réductance Variable (MRV) est surtout appréciée pour sa simplicité et sa robustesse ainsi que son faible coût pour des performances très intéressantes.

Bien que le principe de fonctionnement des moteurs à réductance variable soit connu depuis longtemps, ils n'ont connu de réel développement que récemment, grâce notamment aux puissants outils de calcul, aux performances des matériaux et des techniques de contrôle, ainsi qu'aux multiples applications, surtout en fonctionnement *moteur* (machines lentes à couple élevé ou dispositifs d'entraînement à vitesse élevée), le mode *générateur* étant assez marginal. Mais depuis l'émergence des *EnR*, la MRV pourrait se substituer aux machines conventionnelles car elle s'adapte bien aux faibles vitesses de vent dans des applications éoliennes. D'où notre intérêt pour ce thème !

Le but principal de ce mémoire est de modéliser et simuler une GRV 6/4 à double saillance en association avec son convertisseur, sous environnement MATLAB/SIMULINK. Après quoi, nous envisageons d'adapter ce système générateur à une turbine éolienne. Ces développements constituent le contenu du troisième et dernier chapitre.

Mais auparavant, nous avons entamé notre travail par une introduction à la filière éolienne (*chapitre 1*) suivie d'une présentation des différentes topologies de MRV existantes (*chapitre 2*). Ce deuxième chapitre nous a permis de choisir parmi les différentes structures de GRV existantes une configuration à double saillance simple type GRVDS 6/4 afin de poursuivre les travaux de recherche de l'équipe et qui a déjà fait l'objet d'une modélisation numérique par éléments finis en fonctionnement *moteur*. Pour notre part, nous avons examiné le fonctionnement de ce prototype en mode *générateur* ainsi que les conditions de sa mise en œuvre.

Le dernier chapitre aborde les aspects modélisation et simulation de la GRVDS 6/4 sous environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats des différentes simulations ont montré l'intérêt d'une telle machine pour assurer la continuité du service. En effet, lorsque le courant s'annule dans une phase, il est non nul dans les deux autres phases, car les trois phases sont totalement indépendantes. De plus, tous les résultats obtenus étaient validés par rapport à ceux d'autres équipes travaillant dans le domaine, ce qui nous a encouragé à conclure ce chapitre par une application éolienne.

En effet, nous avons associé le couple machine-convertisseur à une turbine éolienne dont les paramètres ont été empruntés à une référence bibliographique. Comme la puissance de cette turbine (1.5 MW) était nettement supérieure à celle de notre machine (environ 4 kW), nous avons dû effectuer une adaptation de cette turbine par la réduction de ses paramètres (rayon des pales, moment d'inertie et coefficient de frottement). Le modèle a convergé et les résultats de simulation étaient satisfaisants. Cette association a permis de conclure que l'on peut récupérer une quantité conséquente de l'énergie électrique à partir des vents de faibles vitesses.

Comme perspectives pour ce présent travail, nous envisageons :

- 1- d'étudier d'autres topologies de GRV
- 2- d'étudier l'influence des angles d'amorçage et d'extinction sur les performances
- 3- d'améliorer les régulations selon le type de charge
- 4- d'affiner les paramètres des différents étages de la chaîne de conversion pour une meilleure adaptation
- 5- d'étudier le mode connecté au réseau, le filtrage,...etc....



Bibliographie

- [1] S. El Aimani, “Modélisation De Différentes Technologies D’éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille ,2005.
- [2] A. Mirecki, “ Etude Comparative De Chaînes De Conversion D’énergie Dédiées A Une Eolienne De Petite Puissance ”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2005.
- [3] T. Ackermann, L. Söder, “An Overview of Wind Energy-Status” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [4] C. Bourillon, “Wind Energy – Clean Power for Generations. Renewable Energy” Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [5] EWEA Publications, WIND FORCE , A Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020, in: <http://www.ewea.org>.
- [6] H Camblong, “Minimisation De L’impact Des Perturbations D’origine Eolienne Dans La Génération D’électricité Par Des Aérogénérateurs A Vitesse Variable”, thèse de doctorat de l’École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, 2003.
- [7] L. Vadot, “ Etude Synoptique Des Différents Types D’Eoliennes ”, La Houille Blanche, 1957.
- [8] M.R. Dubois, “Review Of Electromechanical Conversion In Wind Turbine”, Report EPP00.R03, Faculty ITS Group Electrical Power Processing, 2000.
- [9] H. Vihriälä, “Control Of Variable Speed Wind Turbine”, PHD thesis, Tampere University 1998.
- [10] P. Mutschler, “The Influence Of Control Strategies On The Energy Capture Of Wind Turbines”, IAS 2000 Conference, Rom, 2000.
- [11] F. Iov, A.D. Hansen, P. Soerensen, F. Blaabjerg, “Advanced Tools For Modelling, Design And Optimization Of Wind Turbine Systems”, Advanced Nordic Wind Power Conference -NWPC’2004, Chalmers, University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2004.
- [12] S. El Aimani, S. Taibi, M. Tounzi, “Diphase Modelling Of A Current Excited Vernier Reluctance Machine”, ICEM 2002, Bruges, Belgium, 2002.
- [13] G. Cuntty, “Eoliennes Et Aérogénérateurs, Guide De L’énergie Eolienne”, Edisud, Aix-en-Provence, ISBN 2-7449-0233, 2001.

- [14] Site des constructeurs Danois : [http : //www.windpower.dk/](http://www.windpower.dk/).
- [15] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, “Introduction A L'électrotechnique Approfondie”, Technique et documentation, Paris, ISBN 2-85206-089-2, 1981.
- [16] J. Wilkie, W.E. Leithead, C. Anderson, “Modelling Of Wind Turbines By Simple Models Wind Engineering”, Vol. 14, N°4, pp. 247-274, 1990.
- [17] J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, “Transient Stability Studies In Grids With Great Wind Power Penetration. Modelling Issues And Operation Requirements”, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas (USA), 2003.
- [18] C. Saget, “ La Variation Electronique De Vitesse Au Service De La Production D'énergie Electrique Par Eolienne ”, REE, N°7, pp. 42-48, 1998.
- [19] R. M. Patel, “Wind And Solar Power Systems”, CRC Press, 1999.
- [20] E. S. Abdin, W. Xu, “ Control Design And Dynamic Performance Analysis Of A Wind Turbine- Induction Generator Unit ”, IEEE Trans. on Energy conversion, vol.15, N°1, 2000.
- [21] S. Heier, “Grid Integration Of Wind Energy Conversion Systems”, Wiley, ISBN 0-471-97143-X.
- [22] L. Moreau, “Modélisation, Conception et Commande de GRV”, Thèse de doctorat, Univ. De Nantes, 2005.
- [23] B. Multon, “Conception Et Alimentation Electronique Des Machines A Reluctance Variable A Double Saillance”, Habilitation à Diriger des Recherches, 1994.
- [24] B. Multon, “Historique Des Machines A Réductance Variable MRV”, Revue IEEE, N°3, Juin 95, pp.3-8, Thèse IEEE-VE95_Multon_partI 1995.
- [25] J. Vaidya, “Advanced Electric Generator & Control For High Speed Micro/Mini Turbine Based Power Systems”, Electrodynamics Associates, Inc. 409 East bridge Drive, Oviedo, FL 32765 And Earl Gregory, Power Generation, Propulsion Directorate AFRL/PRPG, Wright-Patterson AFB, OH 45433.
- [26] G. Segulier, F. Notellet, “Electrotechnique Industrielle”, 2^{ème} édition pages 371-384.
- [27] A. Guettaf, “Contribution A La Conception De La Machine A Reluctance Variable, En Vue De Sa Commande”, Université de Biskra, 2005.

- [28] B. Malik, “Commande De La Machine A Reluctance Variable En Vue D’une Application Alterno-Demarreur Intégré”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.
- [29] P. Z. Ping, J. Ying, Z. Hui, “Study On Switched Reluctance Generator”, Journal of Zhejiang University Science, 2004.
- [30] A. Bouzeid, “Load Effect On The Output Current Generated From The Switched Reluctance Generator”, Proceedings of Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, pp.560-567, London, UK, 1998.
- [31] A. Takahashi, H. Goto, K. Nakamura, T. Watanabe, O. I. Fukushima “Characteristics Of 8/6 Switched Reluctance Generator Excited By Suppression Resistor Converter”, IEEE Transactions On Magnetic, vol. 42, N°.10, pp. 963-0215, Technology Center, Koriyama, Japan.
- [32] R. Krishnan, « Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, Analysis, Design & Applications », pp. 351-384, CRC Press, 2001.
- [33] T. Raminosoa DEA PROTEE “Optimisation Des Performances Des Machines Synchro-Réductances Par Réseaux De Perméances” Ecole Doctorale: Informatique Automatique Electronique Mathématique Thèse de Doctorat 2006.
- [34] E. Hoang, “Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réductance variable à double saillance”, Thèse ENS Cachan ,1995.
- [35] T. Lubin, “Modélisation Et Commande De La Machine Synchrone A Reluctance Variable. Prise En Compte De La Saturation Magnétique”, Thèse de Doctorat, U.F.R. Sciences & Techniques, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2003.
- [36] Y. Liao, F. Liang, Thomas A. Lipo “A Novel Permanent Magnet Motor with Doubly Salient Structure” IEEE transactions on industry applications, vol. 31, N°.5, 1995.
- [37] D.A. Torrey, “Switched Reluctance Generators And Their Control”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N°.1, February 2002.
- [38] R. Cardenas, W.F. Ray, G.M. Asher, “Switched Reluctance Generators For Wind Energy Application”, Proc. IEEE, PESC’95, pp. 559-564, 1995.
- [39] M.R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, “Comparison Of Generator Topologies For Wind Turbine”, Proceeding of the Nordic Countrie Poxer & Industrial Electronics Conference (NORPIE), 2000.

- [40] P. Lobato, A. Cruz, J. Silva, A.J. Pires, “The Switched Reluctance Generator For Wind Power Conversion”, 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, Spain, July 2005.
- [41] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, C. Chillet, D. Matt, S. Taibi, A. Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, “Comparaison De Structures Electromagnetiques Pour Des Applications A Faible Vitesse Et Fort Couple”, RS Série RIGE, maîtrise de l'énergie électrique, pp 259 à 286. 2005
- [42] L. Moreau, M. Machmoum, M.E. Zaim, “Design Of Low Speed Slotted Switched Reluctance Machine For Wind Energy Applications”, Electric Power Components and Systems, Taylor and Francis Journal, accepted on 2006.
- [43] M.A. Mueller, “Design Of Low Speed Switched Reluctance Machine For Wind Energy Converters”, Ninth International Conference on Machines and Drives, Conference Publication, N° 468, IEE 1999.
- [44] L. Moreau, M. I. Lamghari, M. Machmoum, M.E. Zaim, “Design Of A Low Speed Switched Reluctance Variable Machine For Wind Turbine Application”, ICEM 04, Cracow, September 2004.
- [45] B. Multon, J. Bonal, “Electromechanical Direct Drives: Variety, Constraints And Solutions”, CEMD'99, ENS Cachan, 1999.
- [46] B. Yang, X. Dianguo, W. Zongpei, Z. Jinsong, “Modelling Nonlinear Characteristics Of Dual Stator Variable Reluctance Motors Via Teeth Layer Permeability Method”, Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings PIEMC 2000. pp. 892-896 Vol.2, 2000.
- [47] S. Taibi, “Contribution A L'étude, La Conception, Le Dimensionnement Et L'optimisation De Machines A Reluctance Variable De Type Vernier”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, juillet 2002.
- [48] D. Matt, J.F. L libre, “Performances Comparées Des Machines A Aimants Et A Reluctance Variable”, Journal de Physique III, pp. 1621-1641, octobre 1995.
- [49] I. wabushi, N. Kawahara, A. Kume, T. Kabashima, T. Nagasaka, N. Yaskawa, “A Novel High-Torque Reluctance Motor With Rare-Earth Magnet”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 30, Issue 3, pp.609-614, May- June 1994.

- [50] L.E. Unnewehr, W.H. Koch, “An Axial Air-Gap Reluctance Motor For Variable Speed Applications”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-93, pp. 367-376, 1974.
- [51] R. Krishnan, “Switched Reluctance Motor Drives Modelling, Simulation, Analysis Design, And Applications”, CRC Press, ISBN 0-8493-0838-0, 2001.
- [52] M. Abouzeid, “The Use Of An Axial Field-Switched Reluctance Generator Driven By Wind Energy”, Renewable Energy Journal, Vol. 6, N^o. 5, pp. 619-622, 1995.
- [53] M. E Elbuluk, M. D. Kankam, “Potential Starter/Generator Technologies For Future Aerospace Applications”, IEEE Magazine on Aerospace and Electronic Systems, Vol.12, N^o.5, pp.24-31, 1997.
- [54] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund and W. D. Jones, “Detailed Design Of A 30-Kw Switched Reluctance Starter/Generator System For A Gas Turbine Engine Application ” IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.31, N^o.3, pp.553-561, May/June 1995.
- [55] H. Chen, C. Mang, X. Zhao, “Research On The Switched Reluctance Wind Generator System” IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol.3, pp 1936-1941, 2001.
- [56] B. Fahimi, “A Switched Reluctance Machine Based Starter/Generator For More Electric Cars”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp.73-78, 2001.
- [57] O. Ichinokura, T. Kikuchi, K. Nakamura, T. Watanabe, H. Guo, “Dynamic Simulation Model Of Switched Reluctance Generator”, IEEE Trans. Magn. Vol.39, N^o.5, pp3253-3255, 2003.
- [58] M.K.El-Nemr, M.A. Al-Khazendar, E.M. Rashad, M.A. Hassanin, “Modelling And Steady-State Analysis Of Stand-Alone Switched Reluctance Generators”, IEEE Power Engineering Society General Meeting .Vol.3, pp.1894-1899, 2003.
- [59] F. Soares, P.J.C. Branco, “Simulation Of 6/4 Switched Reluctance Motor Based On MATLAB/SIMULINK Environment”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.Vol.37.N^o.3, pp.989-1009, July 2001.
- [60] S. Song, W. Lui “A Novel Method For Nonlinear Modelling And Dynamic Simulation Of A Four-Phase Switched Reluctance Generator System Based On MATLAB/SIMULINK” North-western Polytechnic University, , China. IEEE 2007.

- [61] P. Zai-ping, J. Ying., Z. Hui. “Study on switched reluctance generator” Journal of Zhejiang University Science ISSN 1009-3095, N°. 599072, 2003.
- [62] H. Foch, F. Forest, T. Meynard, “Onduleurs De Tension Structures, Principes, Applications Et Mise En Œuvre”, Techniques de L’ingénieur, Traite Génie Electrique, [D3176, D3177], 1998.
- [63] S. Buso, S. Fasolo, L. Malesani, and P. Mattavelli. “A Dead-Beat Adaptive Hysteresis Current Control”. In IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, N°4, pp. 1174-1180, July/august 2000.
- [64] R. Cardenas, W. F. Ray, G.M. Asher, “Switched Reluctance Generators For Wind Energy Applications”, University of Nottingham, UK 0-7803-2730-6195 \$4.00 0 1995 IEEE
- [65] David A. Torrey, “Switched Reluctance Generators And Their Control”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N°.1, February 2002.

ملخص

الآلة الكهربائية ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة درست بصفة خاصة في نظام محرك، لكن نادرا في نظام مولدة، هذا ما يبرر اختيارنا لمحور هذه المذكرة "المساهمة في دراسة مولدة ذات مقاومة مغناطيسية متغيرة". نعنى هنا بتصميم نموذج لهذا النوع من الآلات و ربطها مع مروج/مقوم ذا دائرة تحكم تسمح بتشغيل جيد للآلة في نظام مولدة و محاكاة النموذج باستعمال البرنامج MATLAB/SIMULINK، بالإضافة إلى ذلك، سيتم ربط النموذج المحاكى بعنفة هوائية. أولا قدمنا وصف للعناصر المكونة للعنفة الهوائية، حيث تمكنا من إيجاد نظامين مختلفين سرعة ثابتة و سرعة متغيرة متعلقة بطبيعة المولد المستعمل (متزامنة، غير متزامنة، ذات مقاومة مغناطيسية متغيرة). ثم قدمنا دراسة نموذجية للآلة المدروسة و تطرقنا إلى ظروف استغلالها. كما قد النموذج الرياضي للآلة المستعملة و محاكاتها، و النتائج التي تحصلنا عليها أثبتت الفائدة من استعمالها. وفي الختام قمنا بربط الآلة بعنفة هوائية بعد التوفيق بين هذه الأخيرة و الآلة، وقد مكنا هذا الربط من الحصول على كمية كبيرة من الطاقة انطلاقا من أماكن ذات سرعات هوائية ضئيلة.

Résumé

La Machines à Réductance Variable est très appréciée pour sa simplicité, sa robustesse et un faible coût pour des performances très intéressantes, surtout en fonctionnement moteur (machines lentes à couple élevé ou dispositifs d'entraînement à vitesse élevée), le mode générateur étant assez marginal. Mais depuis l'émergence des EnR, la MRV pourrait se substituer aux machines conventionnelles, par exemple dans les aérogénérateurs car elle s'adapte bien aux faibles vitesses de vent. D'où le choix de ce thème pour notre magister : il s'agit de modéliser l'ensemble MRV 6/4 à double saillance - convertisseur en demi-pont H puis d'élaborer la commande en fonctionnement générateur sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et ont permis d'associer avantageusement cet ensemble convertisseur à une turbine éolienne.

Abstract

Switched reluctance machine (SRM) is very appreciated for its simplicity, its robustness and a low cost for very interesting performances, especially under motor operation (slow machines with high torque or driving mechanisms at high speed), the generating mode being rather marginal. But since the emergence of EnR the SRM could replace the conventional machines, for example in the aerogenerators because it adapts well at the low speeds of wind. From where the choice of this dissertation topic : the goal is to model a double salient SRM 6/4 associated with a half-bridge converter that control circuit will allow a correct operation in generating mode under MATLAB/SIMULINK environment. The results obtained are very satisfactory and made it possible advantageously to associate this converter unit to a wind turbine.