

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

N° d'ordre :

N° de série :



THESE

Pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE

Option :

COMMANDE ET MODELISATION DES MACHINES ELECTRIQUES

Présenté Par :

MESSAI FEYROUZ

Magistère en Electrotechnique

Thème

**Contrôle optimal d'une chaine de conversion d'énergie utilisant des
générateurs innovants associés à des convertisseurs statiques :
application à l'éolien**

Soutenue le : / / 2014

Devant le jury:

Président : BOUZID AISSA Professeur Univ. Constantine 1

Rapporteur : BENALLA HOCINE Professeur Univ. Constantine 1

Examineurs : CHENNI RACHID Professeur Univ. Constantine 1

DRID SAID Professeur Univ. Batna

ARROUF MOHAMED Professeur Univ. Batna

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes parents et surtout Maman Naima et Maman Zeinab,

Mon mari Messaoud,

Mes petits-enfants Sondous et Mouadth

Toute ma famille,

Mes enseignants,

Tous mes amis,

Et en fin tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir, et soutenu de près ou de loin

durant l'élaboration de ce travail.

F.Messai

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire d'électrotechnique du département d'électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur de l'université de Mentouri Constantine, sous la direction de monsieur, **Benalla Hocine** professeur et chef de département d'électrotechnique de l'université de Constantine¹, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **Bouزيد Aissa**, professeur au département d'électrotechnique de l'université de Constantine¹, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire.

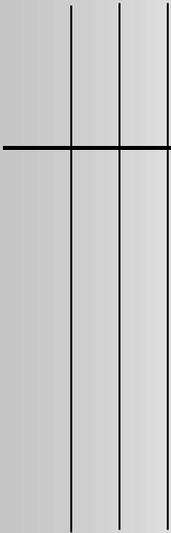
Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **Chenni Rachid** professeur au département d'électrotechnique de l'université de Constantine¹, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur **Drid Saïd**, professeur au département d'électrotechnique de l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant également à monsieur **Arrouf Mohamed**, professeur au département d'électrotechnique de l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de siéger dans ce jury.

Je tiens également à présenter ma gratitude à mon mari Messaoud, qui m'a aidé le long des phases de préparation de cette thèse.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.



SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale.....	2
Chapitre I : Notions fondamentales sur les GRV.....	4
I.1. Introduction.....	5
I.1.1. Historique de la machine à reluctance variable.....	6
I.1.2. Etat de la recherche.....	8
I.2. Structure de la machine a reluctance variable.....	9
I.3. Fonctionnement de la génératrice à reluctance variable.....	11
I.4. Caractéristiques de la GRV.....	13
I.5. Conversion de l'énergie électromagnétique de la GRV.....	15
I.5.1. Calcul de l'énergie magnétique.....	16
I.6. modèle mathématique de la GRV.....	19
I.7. Elément Nécessaire au fonctionnement de la GRV.....	20
I.8. Excitation de la GRV.....	24
A- GRV auto excitée	24
B- Excitation séparée.....	24
I.9. La méthode des éléments fini (MEF).....	25
I.10. Conclusion.....	26
Chapitre II : Modélisation et simulation de la GRV.....	27
II.1. Introduction.....	28
II.2. Techniques de modélisation de la GRV.....	29
II.2.1. Modèle linéaire.....	30
II.2.2. Le modèle look up table (LUT)	31
II.2.3. Méthode base sur l'inductance et flux.....	32
II.2.4. Circuit couplé avec la méthode EF.....	32
II.2.5. Sélection des techniques de modélisation.....	32

Sommaire

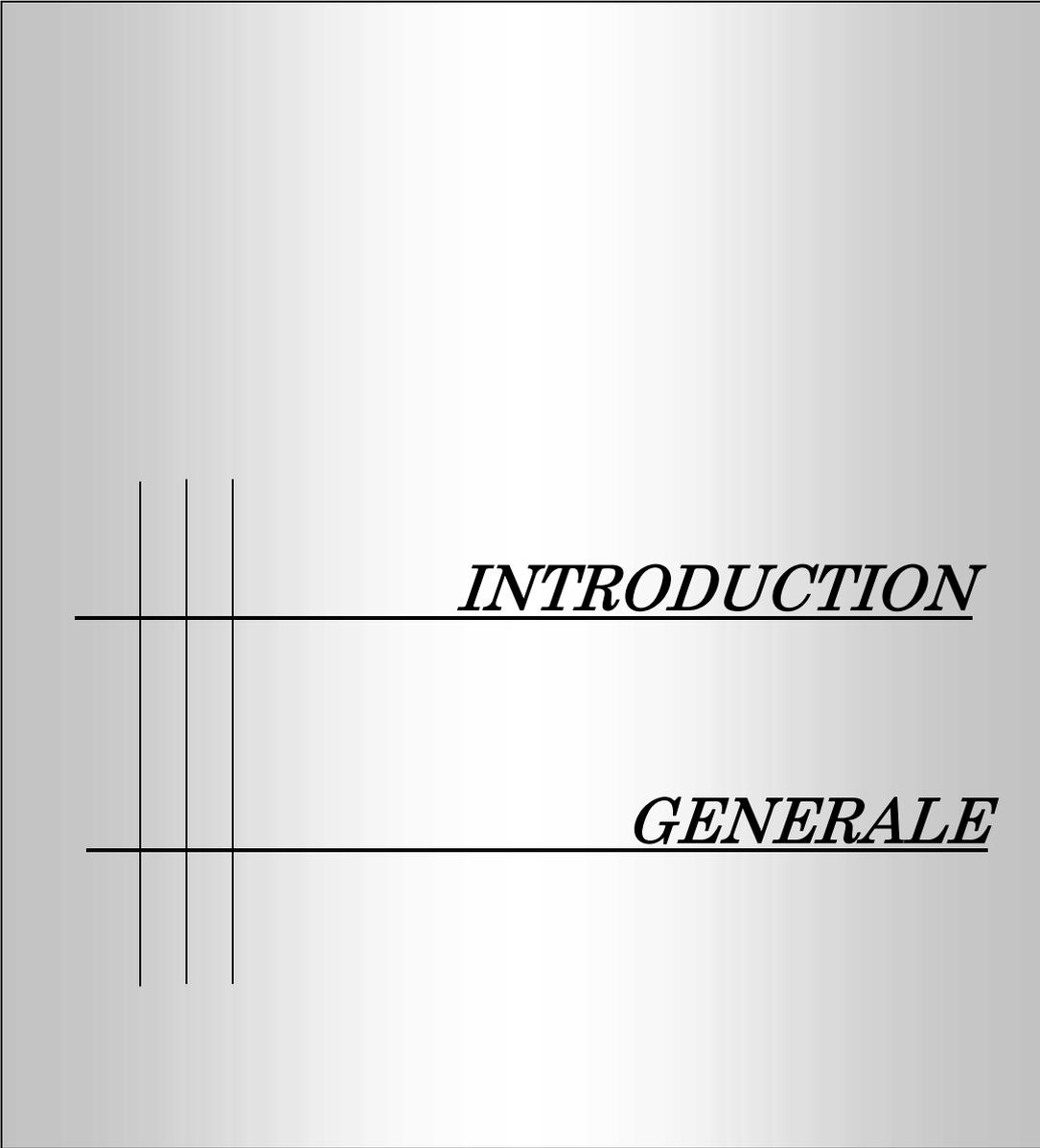
II.3. modèle non linéaire de la GRV	33
II.3.1. Equations électromagnétiques.....	34
II.3.2. Calcul de l'inductance.....	37
II.3.3. Production du couple.....	38
II.4. Simulation d'une GRV 6/4.....	39
II.4.1. Schéma synoptique du modèle.....	39
II.4.2. Hypothèses simplificatrices	40
II.5. Description du modèle élaboré sous Matlab/Simulink.....	41
II.5.1. Bloc GRV.....	42
II.5.2. Bloc convertisseur de puissance.....	45
II.5.2.1. Circuit de puissance.....	45
II.5.3. Bloc bus continu.....	45
II.5.4. Le contrôleur	46
II.5.5. Capteur de position.....	46
II.6. Résultats de simulation de la GRV 6/4.....	47
II.7. Simulation de la GRV 8/6.....	54
II.7.1. Convertisseur de puissance de la GRV 8/6.....	55
II.8. Modèle de simulation de la GRV 8/6.....	56
II.9. Résultats de simulation non linéaires de la GRV 8/6.....	58
II.10. Paramètres de simulation de la GRV non linéaire.....	62
II.11. Conclusion.....	63
Chapitre III : Contrôle et commande optimale de la GRV.....	65
III.1. Introduction.....	66
III.2. Principe de fonctionnement du convertisseur de puissance.....	66
III.2.1. Les trois phases de fonctionnement.....	68
A- Phase d'excitation.....	68

Sommaire

B- Mode de roue libre.....	69
C- Phase de génération.....	69
III.3. Convertisseur a demi pont asymétrique.....	71
III.4. Le Convertisseur à suppression de résistance (SRC).....	73
III.5. Commande de la GRV face aux problèmes d'instabilité et non linéarité.....	75
III.6. Le control de la GRV.....	77
III.6.1. Types de contrôleurs utilises dans la GRV.....	79
III.6.1.1. Modulation de largeur d'impulsion (PWM).....	79
III.6.1.2. Contrôleur du courant hystérésis.....	80
III.6.1.3. Contrôleur de la position d'angle (APC).....	81
III.6.1.4. Régulateur hacheur de courant (CCC).....	81
III.6.1.5. Le contrôleur de haute performance utilise dans la GRV.....	82
III.7. Résultats de simulation.....	82
III.8. Caracteristiques couples-courants-positions.....	91
III.9. CONCLUSIONS.....	92
Chapitre IV : Applications des GRV au domaine éolien.....	93
IV.1. Introduction.....	94
IV.2. Contexte énergétique mondial.....	94
IV.2.1. Ressources énergétiques.....	94
IV.2.1.1. Ressources non renouvelables ou épuisables.....	94
IV.2.1.2. Ressources renouvelables ou non épuisables.....	95
IV.2.2. Besoins énergétiques.....	95
IV.2.2.1. Besoins en énergie primaire.....	95
IV.2.2.2. Besoins en électricité.....	97
VI.2.3. Capacités des énergies renouvelables	98
IV.3. Productions électriques mondiales éoliennes.....	99

Sommaire

IV.3.1. Potentiel de l'énergie éolienne en Algérie.....	100
IV.4. Descriptif d'une éolienne.....	101
IV.4.1. Les différents types des éoliennes.....	102
IV.5. Types de systèmes rencontrés.....	104
IV.5.1 Systèmes utilisant les machines asynchrones.....	104
IV.5.1.1 Machine asynchrone a double stator.....	105
IV.5.1.2 Machine asynchrone connectée au réseau à travers un dispositif d'électronique de puissance.....	106
IV.5.1.3 Machine à double alimentation de stator (MADA).....	106
IV.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	107
IV.5.3. Systèmes utilisant la machine a reluctances variables.....	108
IV.6. Design de la machine.....	108
IV.7. Association de la GRV a une turbine éolienne.....	109
IV.7.1. Description générale de l'ensemble GRV-Turbine éolienne.....	109
IV.7.2. Modèle de simulation.....	110
IV.6. Résultats de simulation non linéaire (turbine à vitesse variable).....	112
V.7. Conclusion.....	115
Conclusion Générale.....	116



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie enregistre une croissance explosive. La consommation intensive des énergies fossiles a entraîné une raréfaction des ressources aujourd'hui exploitables, tandis que leur combustion pollue l'air et produit des gaz à effet de serre. L'épuisement de certaines ressources et le souci de préserver l'environnement redirigent le monde vers les énergies renouvelables. Le remplacement des moteurs à combustion par les moteurs électriques est déjà commencé par l'introduction des moteurs hybrides, qui en général, comme dans les autres applications des machines électriques, utilise des machines à induction ou des machines synchrones à aimants permanents [1,2].

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.

Par contre, ses défauts majeurs sont les ondulations de couple et le bruit acoustique qu'elles produisent. Plusieurs recherches se font actuellement pour réduire ces inconvénients.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une étude sur le comportement de la GRV et d'optimiser sa performance dans de larges plages de conditions de fonctionnement. En effet, pour chaque point de fonctionnement, il sera possible à la GRV de produire sa puissance nominale avec le minimum des ondulations de couple et le minimum de pertes cuivre. Cette optimisation multidimensionnelle sera effectuée sur un modèle informatique non linéaire d'une machine existante.

Notre thèse sera organisée comme suit :

- Le premier chapitre présente un état de l'art sur la machine à réluctance variable ainsi que l'avancement de la recherche dans ce domaine à travers la littérature scientifique. Il traitera aussi le principe de fonctionnement de la **MRV**, les aspects théoriques de fonctionnement d'une machine à réluctance variable **MRVDS 6/4**, et les caractéristiques de fonctionnement en génération décrivent la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique. Ce qui va permettre l'élaboration d'un modèle mathématique basé sur la tension aux bornes de l'enroulement de phase.

- Le deuxième chapitre explique les techniques de modélisation de la **GRV** (Modèle linéaire, le modèle **Look_up_table**, méthode basé sur l'inductance et le flux et la méthode de circuit couplé avec la méthode EF. La meilleure technique est celle qui assure :

- Avoir la capacité de faire des changements sur les paramètres
- Capable d'ajouter le nombre de phases et de modéliser différentes topologies de la GRV
- Facile à modéliser

Il existe beaucoup de caractéristiques non linéaires dans le système de la GRV. Lorsque les conditions de fonctionnement et les charges sont modifiées, les caractéristiques de certains composants dans le système de la GRV sera changé aussi. Donc, il est difficile et complexe à construire le modèle par une simple utilisation d'un modèle mathématique non linéaire, dans ce travail nous avons construit un modèle de simulation non linéaire complet du système de la GRVDS 6/4 et 8/6 basé sur un modèle non linéaire de l'inductance utilisant le convertisseur classique AHBC sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK.

- Le troisième chapitre a été consacré à la simulation de GRV à l'aide d'un convertisseur de puissance économique appelé dans la littérature « convertisseur de suppression de résistance », qui est caractérisé par la moitié de composants en matières d'électronique de puissance par rapport aux convertisseurs classiques largement utilisés avec la GRV. Plusieurs contrôleurs ont été étudiés et simulés. Un choix adéquat d'un contrôleur nommé « PCC » à haute performance a été sélectionné pour l'utiliser avec la GRV.

- Le quatrième chapitre présente un aperçu sur l'utilisation de la GRV dans le domaine des énergies renouvelables après une mise au point du contexte énergétique mondial. Il porte sur l'application et l'emploi des **GRV** dans un système de l'éolienne ; Nous avons associé le couple GRV-convertisseur à une turbine éolienne pour une vitesse variable. nous avons présenté la simulation détaillé de l'association **GRV+Turbine éolienne** sous l'environnement **Matlab/Simulink**.

CHAPITRE I



NOTIONS FONDAMENTALES
SUR LES GRV

I.1. INTRODUCTION

Les moteurs électriques ont toujours constitué des éléments indispensables au fonctionnement des procédés industriels durant ce siècle. De plus, vue la tendance vers l'exploitation de sources d'énergie non polluantes, l'utilisation des moteurs électriques dans les différents secteurs de l'industrie ne fera qu'augmenter.

Plusieurs types de machines ont été inventés au début de siècle, seulement quelques-unes ont été introduites dans les applications industrielles. Vu l'état d'avancement dans les domaines de l'électronique de puissance, de l'informatique et de la commande, les caractéristiques des moteurs électriques étaient mal exploitées et le critère de choix était essentiellement la simplicité de commande. C'est ainsi que le moteur à courant continu était fortement utilisé dans les applications industrielles et domestiques, contrairement à d'autres comme le moteur synchrone, asynchrone et à réluctance variable.

Malgré la simplicité de sa fabrication et ses bonnes caractéristiques électromagnétiques, le moteur à réluctance variable était peu utilisé. La complexité de sa commande et l'ondulation élevée du couple qu'il développe constituaient, son principal handicap.

Pendant les deux dernières décennies, des développements technologiques remarquables ont été réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et de l'informatique. Ceci a permis de relancer les travaux sur la machine à réluctance variable. Les nouvelles techniques de conception assistée par ordinateur ont permis de concevoir différentes structures de machines performantes.

De plus, de nouveaux interrupteurs de puissance très performants et des nouvelles topologies de convertisseurs ont permis une alimentation à rendement amélioré du moteur permettant ainsi une exploitation beaucoup plus efficace de la machine.

Le système de la GRV est composé d'un générateur, un dispositif de commande et d'un convertisseur.

La machine peut être connectée directement à l'arbre du moteur d'entraînement. L'arbre est ensuite couplé directement au rotor du générateur. Ainsi, tout changement dans la vitesse du moteur d'entraînement affectera directement le rotor du générateur, qui ne possède ni un aimants ni enroulements. L'extrémité des bobinages concentrés sur le pôle de stator est

reliée au convertisseur de puissance, qui reçoit des signaux provenant du contrôleur. Le régulateur est le cœur du système, il stabilise la puissance générée à travers le contrôle en boucle fermée de la tension ou du courant. Il envoie des signaux vers les commutateurs du circuit de conversion. Lors de la réception des signaux, le convertisseur effectue l'excitation et la démagnétisation pour créer le flux, puis le ramener à zéro lors de chaque cycle de fonctionnement.

Dans le présent chapitre, nous présentons un état de l'art sur cette machine y compris son historique, principe de fonctionnement, l'avancement dans le traitement de ce sujet dans la littérature mondiale, aussi les différents composants de ce système ont été détaillés.

I.1.1. HISTORIQUE DE LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE [3]

Bien avant que la machine à courant continu occupe une place importante dans plusieurs applications industrielles, de nombreuses machines, connues aujourd'hui sous le nom de machines à réluctance variable, étaient proposées. Parmi les inventeurs, citons le physicien russe Jacobi qui, dans un rapport présenté à l'Académie des sciences de Saint Petersburg en 1834, propose d'appliquer l'électromagnétisme aux machines et décrit une structure tournante à réluctance variable. Dans (D m , 1968 ; Harris et aliés 1981) on rapporte que le professeur et physicien américain Charles Grafton a réalisé entre 1835 et 1840 plusieurs dispositifs originaux à fer tournant.

Vers 1840 en France, l'ingénieur Graiffe a construit un moteur de démonstration. Ce moteur est aussi autopiloté mécaniquement. D'autres moteurs similaires furent conçus en 1837 par l'Américain Davenport pour actionner une presse d'imprimerie et par l'Écossais Robert Davidson en 1839 pour l'entraînement d'un tour. À cette époque, le français Gustave Froment réalise un moteur de grandes dimensions.

Davidson a utilisé l'un des premiers moteurs tournants à réluctance variable en 1842 pour entraîner à 6 km/h un véhicule ferroviaire électrique. En 1845, Gustave Froment réalise un moteur tournant performant, ancêtre des moteurs à réluctance variable à double saillance. Ce moteur a servi à entraîner des machines à tracer des divisions sur des règles, cadrans, etc... En 1968 Dumas, montre un moteur à 4 phases où on peut voir la disposition astucieuse des bobines d'une même phase. Ceci permet de minimiser la longueur des trajets du flux dans les circuits de retour. Ce moteur fût utilisé pour remonter des poids d'horloge et pour entraîner une meule à chanvre (Japing, 1967).

Un autre dispositif plus puissant a été construit par Froment. Ce moteur est constitué d'un empilage de 5 structures élémentaires (Beltran, 1991) comprenant chacune 4 électroaimants à deux pôles bobinés et commutateur mécanique permettant l'autopilotage. Le couple de ce moteur a atteint 500 N.m environ. Il faut mentionner que toutes ces machines à réluctance variable n'ont été utilisées que pour des fonctionnements en mode moteur. Leur apparence passive n'a pas laissé entrevoir leur réversibilité.

Depuis, le moteur à réluctance variable est resté marginal. Il fut dépassé par les machines synchrones permettant de réaliser les plus grands générateurs, par les machines asynchrones pouvant se mettre en marche sans dispositif auxiliaire et fonctionner sur le réseau alternatif et, évidemment, par les machines à courant continu à collecteur, facilement commandables pour fonctionner à vitesse variable.

Malgré tout cela, le moteur à réluctance variable n'a pas complètement disparu. Ainsi, il a actionné des systèmes d'horlogerie (horloge Froment, 1854), des jouets (petits moteurs monophasés) vers 1900 - 1910, des dispositifs de transmission électrique (synchromachines dans les bateaux de guerre) en 1920, des rasoirs (Remington) ou encore des tourne-disques (78 tr/min).

Dans les années 60 qu'on s'est intéressé de nouveau aux moteurs à réluctance variable (Lawrenson, 1964). C'est dans universités anglaises (à Leeds et à Nottingham) que furent entrepris les travaux en premier. Ensuite, sont apparus les moteurs synchrones à réluctance variable à rotor segmenté, à barrières de flux et à rotor axialement laminé (Lawrenson, 1967). On a pu augmenter ainsi le rapport de saillance et le facteur de puissance.

Multon (1994) présente une étude de l'historique et traite des aspects de conception d'alimentation et de modélisation des machines à réluctance variable. Quelques informations, citées précédemment, sont tirées de cet ouvrage.

Notons enfin, que, durant ce siècle, les performances des machines électriques se sont considérablement améliorées grâce aux progrès des matériaux (surtout isolants et magnétiques), à une meilleure optimisation permise par l'accroissement des moyens de calcul et, enfin, par l'utilisation de fréquences plus élevées (électronique de puissance) [3].

I.1.2. ÉTAT DE LA RECHERCHE

La recherche bibliographique montre que la plupart des études faites se focalise sur la commande du moteur à réluctance variable, au détriment de la génératrice qui n'a pas été suffisamment traitée. A ce propos, on note que plus de 55% des articles consultés traitent du fonctionnement moteur, analysent son comportement et ses applications.

Parmi 56 articles consultés abordent le thème de la Génératrice à Réluctance Variable, dont une grande partie est réservée à la commande et le control, 38% aux applications éoliennes.

- ↳ Radun expose les applications possibles des GRV et leurs défauts.
- ↳ D. E. Cameron travaille sur le control de la génératrice [4].
- ↳ Torrey travaille sur l'optimisation de la commande [5].
- ↳ Faiz est porté plus sur le design et l'optimisation de l'efficacité de la conversion [6].
- ↳ Babak Fahimi, B.Raymond travaille sur les capteurs de position pour les applications spatial [7].
- ↳ R. Cardenas H.Chen et Nasserredine travaillent sur les éoliennes et abordent les aspects design et commande adaptée à la chaine de conversion du système éolien [8].

L'objectif de la commande de la GRV est de maintenir un rendement acceptable, pour une efficacité maximale, le tout sur une plage de vitesses variables. Ainsi, la stratégie à adopter se doit de régler les variables qui régissent la commande du convertisseur, comme les angles de commutation à l'ouverture et à l'arrêt " θ_{on} , θ_{off} " [9,10].

Une approche pour la commande de la GRV par des simulations est l'angle d'ouverture est fixe et celui d'arrêt est variable pour produire le courant désiré à la sortie du bus DC a été présenté par [11].

Dans [12] un modèle d'une GRV basé sur la linéarisation de la commande de la tension de sortie est abordé et une minimisation de la pénalité d'excitation de la GRV est étudiée.

Une conception détaillée de la GRV pour un turbomoteur dans laquelle la puissance de sortie est commandée en ajustant le niveau de courant avec des angles d'ouverture et d'arrêt fixes est présentée dans [13].

Un nouveau convertisseur pour la GRV destiné à améliorer l'efficacité de conversion d'énergie en commandant la tension de sortie du bus DC avec la vitesse du rotor, par un convertisseur dévolteur additionnel entre le système et la charge est présentée par [14].

L'auteur [15] traite de l'opération monophasée de la GRV avec défauts.

L'analyse de panne et la recherche sur les conditions d'excitation de la GRV sont décrites dans [16].

L'utilisation des GRV de 7.5 kilowatts en fonctionnement générateur et la discussion des méthodes de "commande en vitesse et commande en couple" et leurs applications pour les turbines à vitesse variable est traitée par [17].

D'après l'étude bibliographique précédente, on conclut qu'il y a un besoin de recherche de stratégies pour un contrôle applicable et rentable qui fournisse l'efficacité requise pour les GRV avec un rendement maximal, sur une large plage de vitesse.

Aussi des publications existantes portées sur l'analyse du comportement de la machine [18,19] et vise également une application spécifique telle que le véhicule électrique [20,21], le système de générateur démarreur [22] et de son utilisation pour des applications de basse tension [23].

Une tentative a été faite pour évaluer les performances de la machine en mode de génération en testant divers paramètres tels que les angles θ_{on} et θ_{off} , la tension et de la vitesse [24,25]. La recherche a été cependant limitée à l'analyse constante de puissance de sortie [26,27]. En outre, les études ont été limitées à la plage de fonctionnement à haute vitesse.

Cette thèse propose une application d'une génératrice à réluctance variable sur une chaîne de conversion éolienne utilisée un contrôleur optimale et un type de convertisseur économique afin de fournir l'énergie d'excitation et de récupération optimale avec un coût moins cher.

I.2. STRUCTURE DE LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE

En général, la MRV dont leurs éléments constitutifs sont montrés à la Fig.I.1, est une machine à double saillance où les pôles statoriques et rotoriques empiètent dans l'air [28].

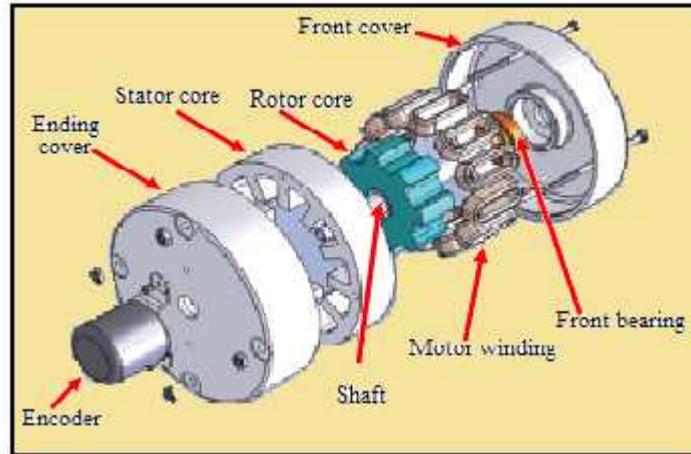


Fig.I.1 La construction de la MRV

Le rotor et le stator sont faits de tôles d'acier et seulement les pôles de stator ont des enroulements concentrés autour d'eux [29]. Cela laisse le rotor sans enroulements, sans aimants. Les enroulements d'un des pôles de stator sont connectés en série avec le stator opposé pour former une seule phase.

Parmi les configurations de la MRV on peut citer la machine triphasée 6 pôles au stator et 4 pôles au rotor (6/4), la machine à quatre phase 8/6 et aussi une machine à deux phases 4/2.

La Fig.I.2. (a) montre un exemple de la machine 2 phases avec configuration de 4/2 pôles, la Fig.I.2. (b) représente une machine triphasée avec une configuration de 6/4 pôles et la Fig.I.2. (c) représente une machine à 4 phases avec une configuration de 8/6 pôles.



(a) MRV à deux phases 4/2 (b) MRV à trois phases 6/4 (c) MRV à quatre phases 8/6

Fig.I.2 Machine à reluctance variable à double denture

I.3. FONCTIONNEMENT DE LA GENERATRICE A RELUCTANCE VARIABLE

La machine fonctionne de telle sorte que le rotor se déplacera vers la position où l'inductance est maximale. La rotation du rotor est assurée par la mise sous tension et hors tension des enroulements de phase sur les pôles de stator. Lorsque les enroulements sont sous tension, le pôle du stator se comporte comme un électro-aimant tirant ainsi le rotor vers la phase excitée. La phase du stator doit être mise sous tension en synchronisme avec la position du rotor afin d'assurer une rotation continue.

Lorsque le rotor se déplace vers le pôle du stator, il y aura un changement dans la distance de l'entrefer, entraînant un changement de la réluctance du chemin magnétique. Lorsque le rotor est aligné sur le pôle du stator, la réluctance est minimale, tandis que l'inductance est maximale. Quand le rotor s'éloigne du pôle du stator, l'intervalle d'air augmente et l'inductance commence à diminuer. Au cours de la position non alignée, l'inductance sera à sa valeur minimale.

La Fig.I.3 présente une explication des positions alignées et non alignées qui permettent l'obtention des valeurs max et min de l'inductance.

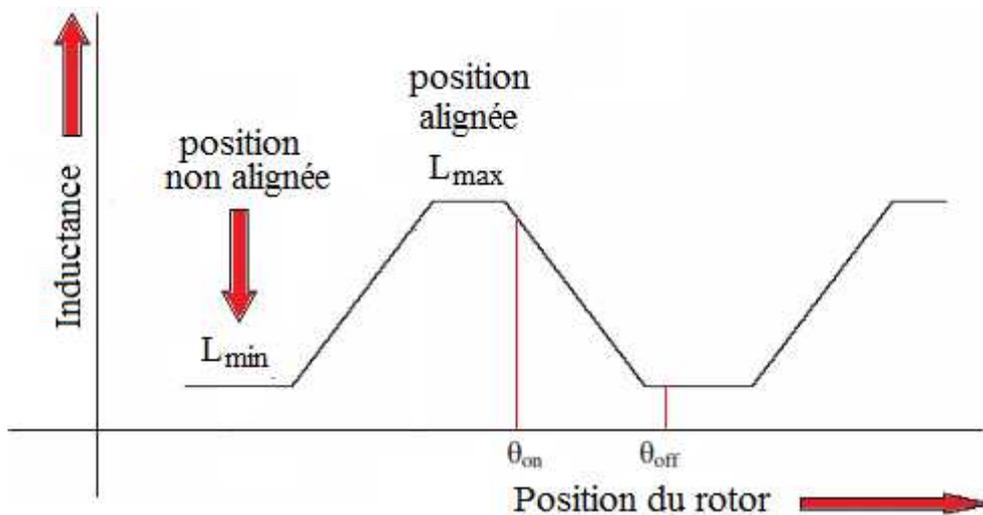


Fig.I.3 Représentation de la position alignée et non alignée

Par une excitation adéquate de l'enroulement de phase, la machine peut fonctionner comme un moteur au cours de l'augmentation de l'inductance et comme un générateur au cours de la région de décroissance d'inductance.

Pour faire fonctionner la machine comme un générateur, les enroulements doivent être excités au moment où le rotor se déplace loin des pôles de stator.

L'excitation de la machine pendant l'opération de génération est illustrée dans les Fig.I.4.a.(ii) et I.4.b.(ii) alors que en mode moteur, l'excitation est réalisée dans la région de l'accroissement de l'inductance. Quand la phase du stator est excitée au moment où le rotor est en mouvement et effectue un passage du pôle de stator comme dans la Fig.I.4.a.(ii), il y aura un couple essayant de réaligner les pôles arrières ensemble.

Le couple T est produit par la tendance du mouvement du rotor vers l'enroulement de phase statorique excitée. Il est indépendant de la direction du courant, i comme il est montré par l'équation suivante :

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (I.1)$$

Où L est l'inductance de phase qui varie en fonction du courant i et de la position du rotor .

De l'équation (I.1), il est clair que la valeur du couple dépende de la pente de l'inductance, il est positive en mode moteur et négative en mode générateur. Dès que les pôles commencent à se chevaucher, le couple commence à se développer et quand les pôles ne se chevauchent pas, le couple sera nul et aucune énergie n'est convertie.

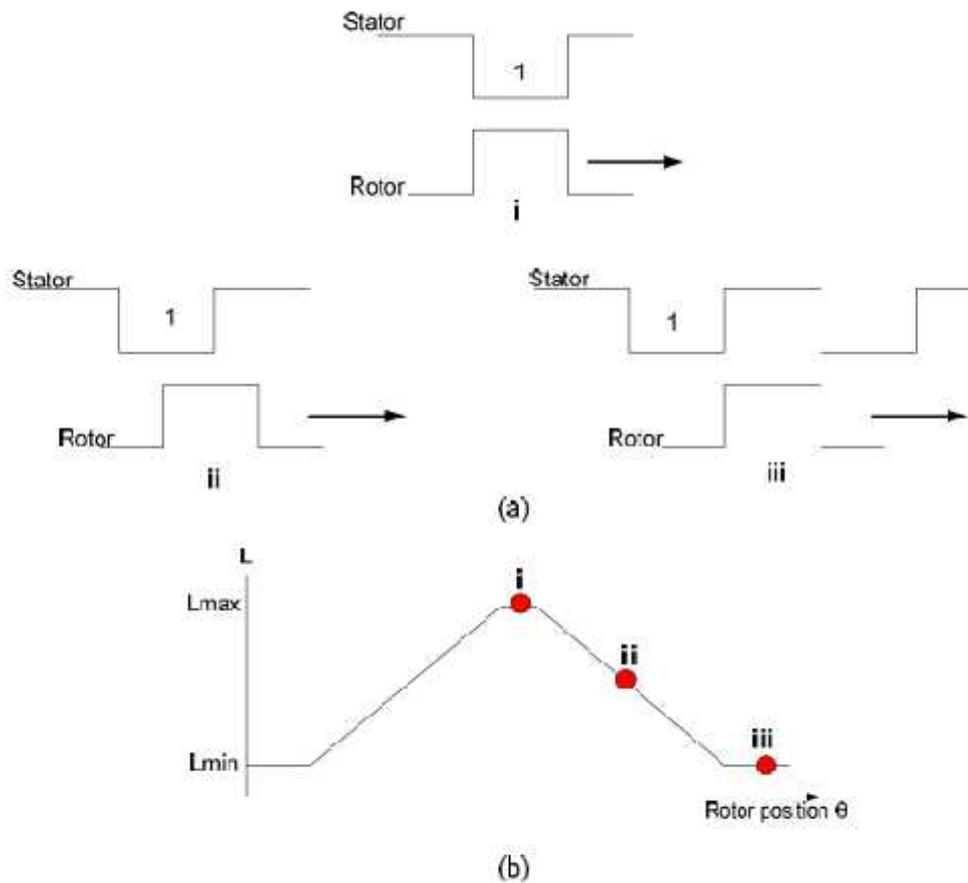


Fig.I.4 L'inductance en fonction du mouvement du rotor. (a) mouvement du rotor en fonction du pole statorique i) Inductance Maximale, réluctance minimale (alignement complet) ii) Inductance diminuant linéairement iii) Inductance minimale (mauvais alignement) (b) Profil complet de l'inductance [30]

I.4. CARACTERISTIQUES DE LA GRV

Les caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être déterminées de l'écoulement du flux dans le matériau magnétique. Le flux est établi lorsque le courant circule à travers l'enroulement de phase au cours de l'excitation. L'intensité du champ magnétique est représentée par le débit du flux. Elle change avec la densité du courant et la position du rotor. L'intensité du flux est élevée durant la position alignée ou le flux circule directement du pôle du stator vers le pôle du rotor. Comme le rotor se déplace, l'intervalle d'air augmentera et le flux diminuera est en mesure de faire un lien vers le pole du rotor. Le changement du flux avec le courant de phase en fonction des différentes positions du rotor est également connu sous le nom de la courbe de magnétisation (Fig.I.5).

L'inductance de phase peut être déterminée par la courbe d'aimantation par la relation suivante :

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) i \tag{I.2}$$

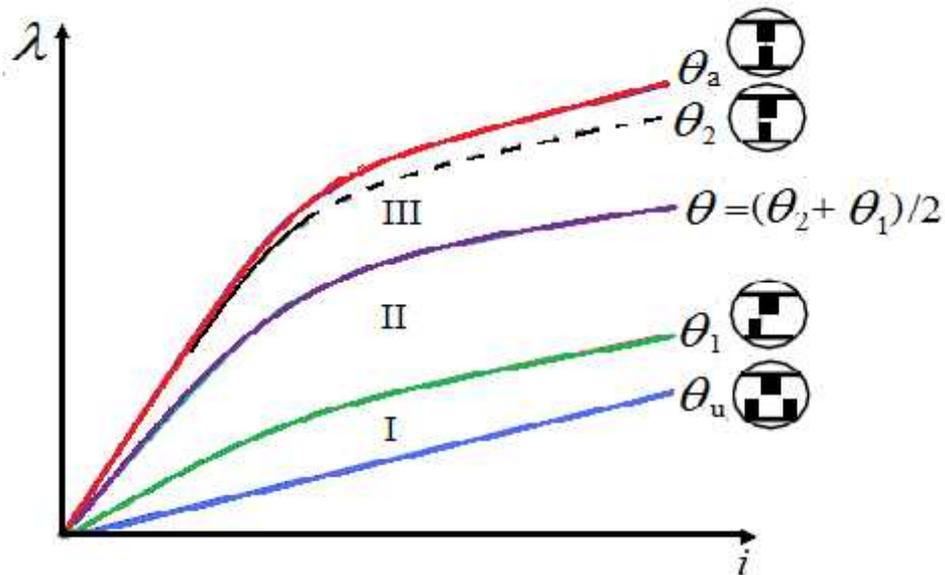


Fig.I.5 Flux en fonction du courant aux différentes positions
(Alignés aux non alignés) du rotor [30]

Où λ est le flux, L est l'inductance de phase, i le courant de phase et θ l'angle de position du rotor. La courbe de l'inductance en fonction de la position du rotor et le courant or déterminée à l'aide équation (I.2) est illustrée à la Fig.I.6.

Donc, la GRV peut être représenté en utilisant le flux et le profil de l'inductance. Les détails sur la représentation des caractéristiques de la machine sont expliqués dans le Chapitre 2, qui met l'accent sur les caractéristiques électromagnétiques non linéaires de la machine.

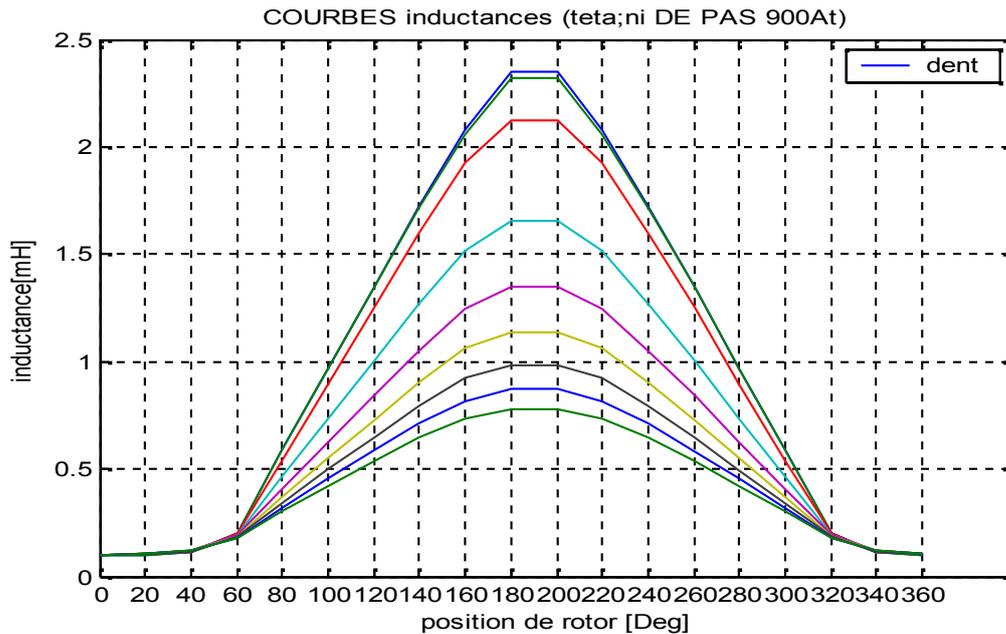


Fig.I.6. Variation de l'inductance de phase avec la position du rotor au différent courant de phase pour la machine 6/4

I.5. CONVERSION DE L'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE DE LA GRV

Le principe de la conversion de l'énergie pour la GRV est mieux expliqué à l'aide du convertisseur classique en demi-pont asymétrique (AHBC) et la courbe d'aimantation. La batterie est connectée directement à l'enroulement de phase à travers les interrupteurs et les diodes.

Comme mentionné précédemment, l'excitation est effectuée quand le rotor est en train de s'éloigner des pôles du stator en fermant les interrupteurs du convertisseur. Lorsque les interrupteurs T_1 et T_2 sont fermés comme montré dans la Fig.I.7.(a), le courant circule de la batterie vers les enroulements à travers les commutateurs. La tension est obtenue aux bornes de l'enroulement de phase ; donc le courant se crée lentement et l'énergie est stockée dans le circuit magnétique de la bobine. L'énergie est développée par le couple résistant sur le moteur d'entraînement. Les deux commutateurs s'ouvrent quand ils reçoivent le signal du contrôleur après avoir atteint l'angle de coupage (θ_{off}) comme montre la Fig.I.7.(b). Le passage du courant dans l'enroulement est maintenue, cependant au lieu de stocker de l'énergie, l'énergie déjà stockée est libérée à travers les diodes entrant dans la batterie ou la charge.

La sortie générée par la GRV en utilisant l'AHBC est en forme DC. Par conséquent, un autre convertisseur est nécessaire pour la convertir en une sortie en courant alternatif, si nécessaire.

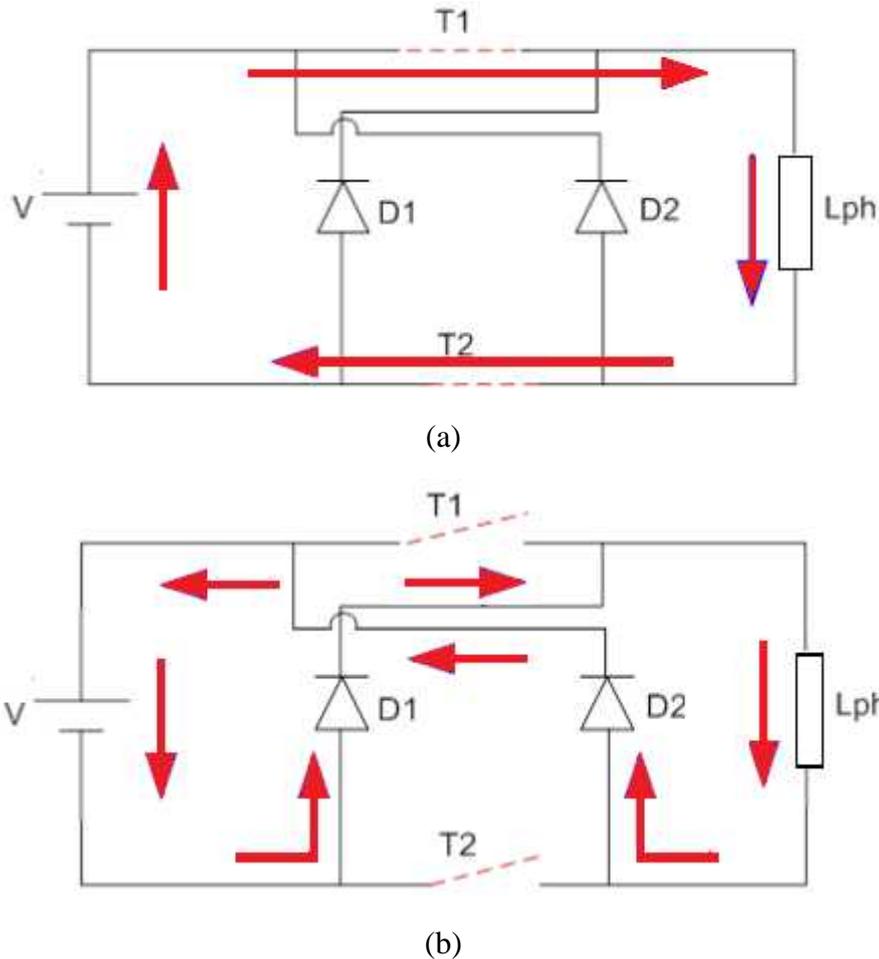


Fig.I.7 la circulation du courant dans l'enroulement d'une phase à l'aide d'un convertisseur à demi-pont asymétrique (AHBC) au cours de la phase d'excitation (a) et génération (b)

I.5.1. CALCUL DE L'ENERGIE MAGNETIQUE

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de la courbe de magnétisation de flux en fonction du courant à une position particulière du rotor comme le montre la Fig.I.5. Cependant, pour faciliter la compréhension, l'explication est faite en supposant une région linéaire ou le flux magnétique varie linéairement avec le courant comme illustré à la Fig.I.8.

Etant donné que l'excitation est effectuée au moment où la valeur de l'inductance soit maximale, le courant de phase, i augmentera lentement de 0 à A comme dans la Fig.I.8.(a) et l'énergie magnétique stockée, W_1 peut être écrite comme suit :

$$W_1 = \int_0^{i_m} i \cdot d\lambda = \frac{1}{2} i_m^2 L_a \tag{I.3}$$

Ou i_m et λ sont le courant et le flux. La pente de OA représente l'auto-inductance de la phase à la position alignée L_a , tandis que la pente CO représente l'auto-inductance de la phase à la position non-alignée L_{un} .

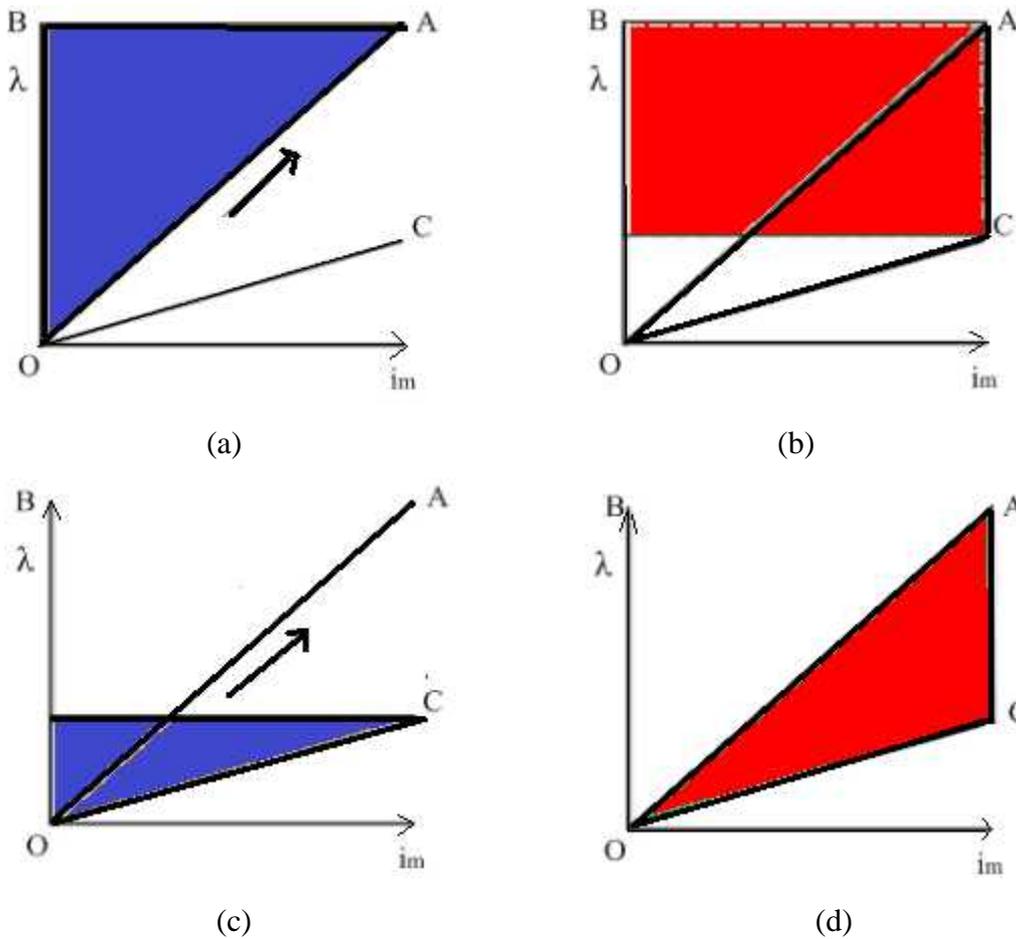


Fig.I.8 processus de conversion d'énergie linéaire pour la GRV en utilisant la courbe de flux par rapport au courant (a) l'énergie stockée magnétique, W_1 (b) l'énergie revenu à l'alimentation, W_2 (c) l'énergie restante stockée est retourné à l'alimentation, W_3 et (d) co-énergie, W_{total}

Lorsque le rotor se déplace loin du pôle de stator et atteint la position d'arrêt, aucune énergie n'est extraite du moteur d'entraînement. A ce moment, l'énergie W est renvoyée à la source.

$$W_2 = i_m^2 (L_{un} - L_a) \tag{I.4}$$

Au cours de la position non alignée, le couple est nul. Par conséquent, le restant de l'énergie stockée W est également renvoyée à la source.

$$W_3 = \int_{i_m}^0 i \cdot d\lambda = -\frac{1}{2} i_m^2 L_{im} \tag{I.5}$$

L'énergie totale générée W_{total} est la somme des surfaces, qui consiste à ajouter de l'énergie emmagasinée et de l'énergie magnétique viciée d'être renvoyée à l'alimentation, à la fin de chaque séquence.

$$W_{total} = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{1}{2} i_m^2 (L_{im} - L_a) \tag{I.6}$$

Le même concept de calcul de l'énergie peut être appliqué lorsque la saturation est prise en compte. Il existe deux types d'énergie dans la courbe d'aimantation ; l'énergie magnétique stockée, W_m et la co-énergie, W_c représentée graphiquement à la Fig.I.9. La puissance moyenne de sortie générée par le GRV est proportionnelle à la zone comprise entre la courbe alignée et non alignée. Lorsque la saturation est prise en considération, le calcul de la co-énergie magnétique est déterminée par l'intégration de la surface sous la courbe de magnétisation telle que définie par l'équation suivante :

$$W_c = \int_0^i \lambda \cdot di \tag{I.7}$$

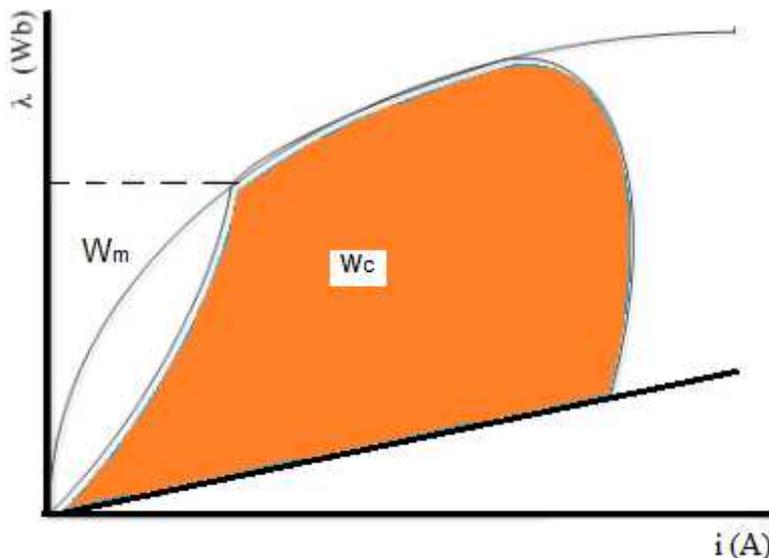


Fig.I.9 La conversion non-linéaire de l'énergie magnétique dans le générateur à réluctance commutée

I.6. MODELE MATHEMATIQUE DE LA GRV

Le modèle mathématique de la GRV est représenté par l'équation de la tension aux bornes de l'enroulement de phase. Il se compose d'une résistance étant en série avec une inductance. Chaque phase de la GRV est considérée comme indépendante de l'autre de fait que le courant et le flux augmentent et retournent à zéro au cours de chaque cycle de fonctionnement. Ainsi, la tension de la phase V à travers l'enroulement est exprimée par l'équation :

$$V_j = Ri_j + \frac{d\psi_j}{dt} \quad (I.8)$$

Où R est la résistance de phase, ψ_j est le flux de la phase j , qui en résulte du courant i circulant dans la phase excitée au temps, t . Etant donné que le flux varie en fonction du courant et de la position du rotor, l'équation (I.8) peut en outre être étendue de la manière suivante :

$$V_j = Ri_j + \left(L_j + i_j \frac{\partial L_j}{\partial i_j} \right) \frac{di_j}{dt} + i_j \frac{\partial L_j}{\partial \theta} \dot{\theta} \quad (I.9)$$

Où L_j , θ sont : l'inductance de la phase j , la position du rotor et de la vitesse, respectivement. Le dernier terme dans l'équation (I.9) est la f.c.e.m, qui peut être soit positive ou négative en fonction de la pente du profil de l'inductance. Le circuit équivalent pour la GRV peut donc être représenté comme dans la Fig.I.10. Etant donné que la force contre-électromotrice est négative lors de la pente de diminution de l'inductance, il va s'ajouter à la tension de borne et aide à augmenter le courant de phase lors de l'opération de génération. Le courant dans l'enroulement de phase reste le même, mais la tension aux bornes change de polarité. Par conséquent, l'équation (I.9) devient négative et le courant sera à zéro à la fin du cycle, lorsque l'inductance atteint sa valeur minimale.

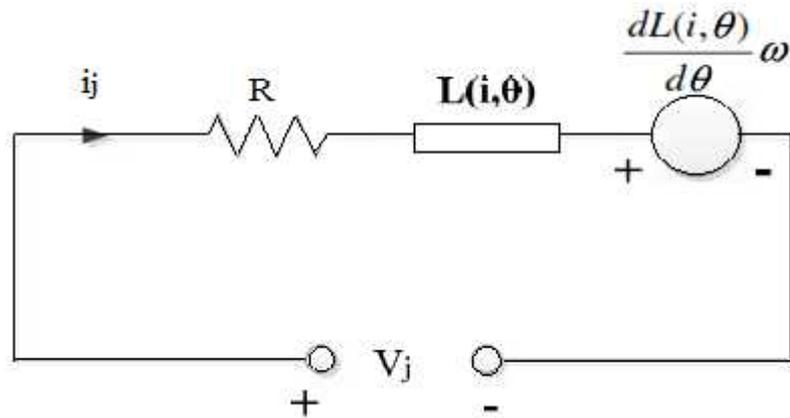


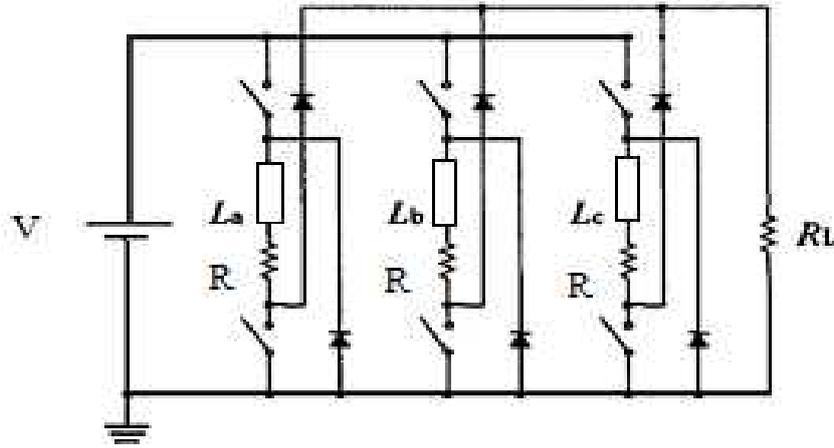
Fig.I.10 Schéma équivalent de la GRV pour une phase

I.7. ELEMENT NECESSAIRE AU FONCTIONNEMENT DE LA GRV

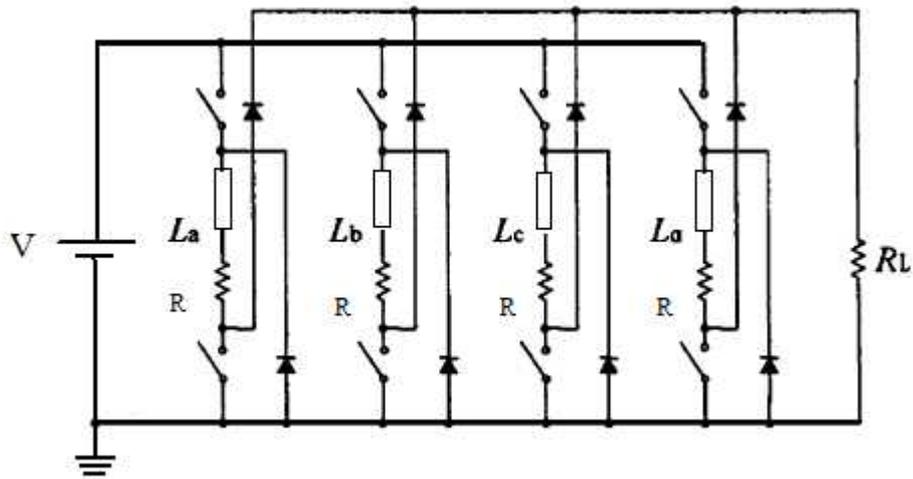
Contrairement aux machines à induction ou les machines à courant continu, les machines à réluctance variable ne peuvent pas fonctionner directement à partir d'une alimentation alternative ou continue. La présence des convertisseurs de puissance et le contrôle adéquat sont indispensables. Le convertisseur de puissance est un commutateur électronique, qui contrôle les courants de phase afin de produire un mouvement continu. Le circuit de commande assure le contrôle du courant et la position pour produire les signaux de commandes correctes pour permettant au convertisseur de puissance de répondre aux besoins imposées par l'utilisateur.

De nombreux circuits de convertisseurs de puissance ont été proposés pour la MRV. Le convertisseur le plus commun est le demi-pont asymétrique, comme illustré à la Fig.I.11 pour une machine à trois et à quatre phases. Chaque demi-pont asymétrique dispose de trois modes principaux de fonctionnement, mode de génération, mode de roue-libre et mode de magnétisation.

Comme chaque enroulement de phase est relié à son propre demi-pont asymétrique il n'y a pas de restriction sur le nombre d'enroulements de phase [31,32].



(a) Convertisseur de trois phases



(b) Convertisseur de quatre phases

Fig.I.11 convertisseur à demi-pont asymétrique de 3 et de 4 phases

L'avantage principal de la MRV est la simplicité du convertisseur de puissance à construire et le faible nombre de transistors. L'efficacité est optimisée en minimisant l'angle de conduction (θ_{on}). Quelque mode de fonctionnement en multi-phase pourrait être obtenu lorsque la phase séquentielle est mise en marche avant que la phase précédente a été mise en arrêt. Une MRV à fonctionnement multi-phase est rapportée par Mecrow [33,34].

La fonction du convertisseur est d'effectuer une excitation afin de créer le flux dans le bobinage et de le démagnétiser pour amener le flux à zéro avant que la phase suivante soit excitée [35]. Par conséquent, il doit être composé d'un commutateur pour permettre au courant de circuler dans l'enroulement et une diode pour permettre la récupération de l'énergie magnétique vers l'alimentation ou la charge. La performance de la stratégie de commutation

donne un impact sur l'efficacité de la GRV [36]. Le courant peut être contrôlé par la synchronisation des impulsions du courant avec la position du rotor.

Il existe plusieurs autres types de circuits qui utilisent des composants de moindre importance par rapport à AHBC comme convertisseur de puissance C-dump, convertisseur R-dump, convertisseur de type bifilaire et aussi le convertisseur DC diviser [37,38].

Toutefois, en raison de son disponibilité sur le marché et sa souplesse de réglage, l'AHBC est sélectionné. Il a la capacité de régler le courant de phase à l'aide de trois séquences de commutation comme il est montré sur la Fig.I.12 pour : (a) une tension positive, (b) une tension nulle et (c) une tension négative.

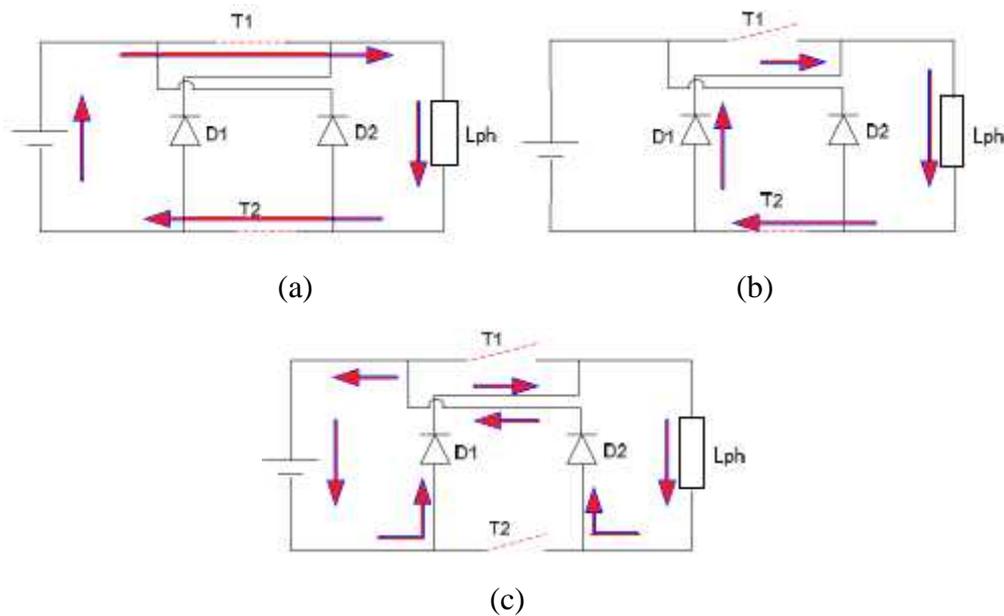


Fig.I.12 séquence de commutations du convertisseur AHBC pour : (a) tension positive (b) tension zéro et (c) tension négative

Cette forme de commutation est adaptée au cours de la plage de vitesse basse et moyenne, qui emploie le mode de découpage du courant [36]. Lorsque les deux interrupteurs T₁ et T₂ sont fermés, la tension V à la borne de l'enroulement de phase est donnée par équation suivante :

$$V - \dot{S}i \frac{dL}{d_n} = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{I.10}$$

Où \dot{S} , i , R , L , est la vitesse, le courant de phase, la résistance de phase, l'inductance de phase et la position du rotor, respectivement. Lorsque T₁ est ouvert et T₂ est fermé comme à la Fig.I.12.(b), le courant passe à travers les diodes de roue libre et le bobinage. Par

conséquent, aucune énergie n'est retournée à la source. Pendant ce temps, en fonction de la vitesse, la force contre-électromotrice de la bobine va aider à augmenter ou à maintenir le courant dans l'enroulement, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$\check{S}_i \frac{dL}{d_\omega} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (I.11)$$

Lorsque les deux interrupteurs sont ouverts comme indiqué sur la Fig.I.12.(c), le courant est en roue libre à travers les diodes, et l'énergie est renvoyé soit à la charge, ou à la recharge de l'alimentation. Quand le courant revient à la source, l'enroulement de phase est soumis à une tension continue négative. À ce stade, la forme du courant dépende de la tension de force contre-électromotrice. La relation entre cette f.c.e.m et la tension aux bornes des enroulements détermine le comportement du courant de phase [27]. Trois conditions peuvent se produire :

- Tension f.c.e.m > tension aux bornes des enroulements - le courant va augmenter après désactiver angle off avant de se réduire à zéro.
- Tension f.c.e.m = tension aux bornes - le courant restera constante et de réduire à zéro lorsque le rotor se rapproche de la région d'inductance minimale
- Tension f.c.e.m < de tension aux bornes - le courant tombe à zéro après désactiver angle du fait de la tension négative.

L'effet de la f.c.e.m et la tension aux bornes des enroulements après que les commutateurs sont fermés est représenté sur la Fig.I.13. On peut voir que le courant de phase peut être réglé par les commutateurs du circuit du convertisseur. Le convertisseur AHBC est largement utilisé dans les applications nécessitants la basse, moyenne et haute vitesse tel que, le démarreur / générateur dans les avions et dans les applications de l'énergie éolienne. Bien qu'il ait été rapporté que il de l'instabilité sous le contrôle de tension en boucle ouverte [39], il peut être surmonté par l'emploi d'un circuit de commande en boucle fermée. L'exploitation des modes de convertisseur sera expliquée dans la section suivante.

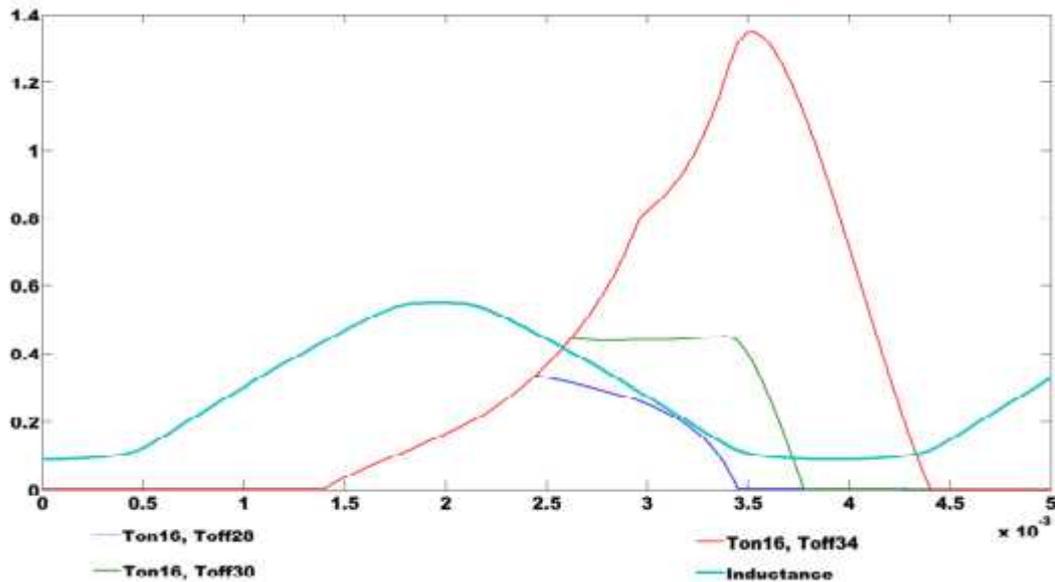


Fig.I.13 Graphique de courant de phase (A) et l'inductance (H) en fonction du temps (s) montrant l'effet de la f.c.e.m sur le courant de phase à une tension de 150 V et une vitesse de 200rad / s. L'angle turn-on est constante à 16deg alors que l'angle turn off varie

I.8. EXCITATION DE LA GRV

La GRV nécessite une alimentation externe comme un aimant permanent [40] ou une batterie pour créer le champ magnétique, ce rôle peut être rempli par une excitation auto ou séparée. Le premier a un circuit simple à la fois l'excitation et de la production part de la même ligne de bus.

A. 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} [41,42,43].

B. 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.

Cette dernière est couramment utilisée sous l'application insensible aux défaillances, car il comporte des lignes séparées pour l'excitation et la génération de puissance [44,45], comme représenté sur la Fig.I.14. Grâce à cette caractéristique, le circuit d'excitation séparée peut être contrôlé de façon indépendante [46]. Le circuit est normalement utilisé pour les applications qui nécessitent des fonctionnalités de haute sécurité, comme pour les applications de démarreur / générateur de l'avion [45]. Une bonne explication lui a été consacrée dans [39]. Dans cette thèse, on optés pour ce type d'excitation.

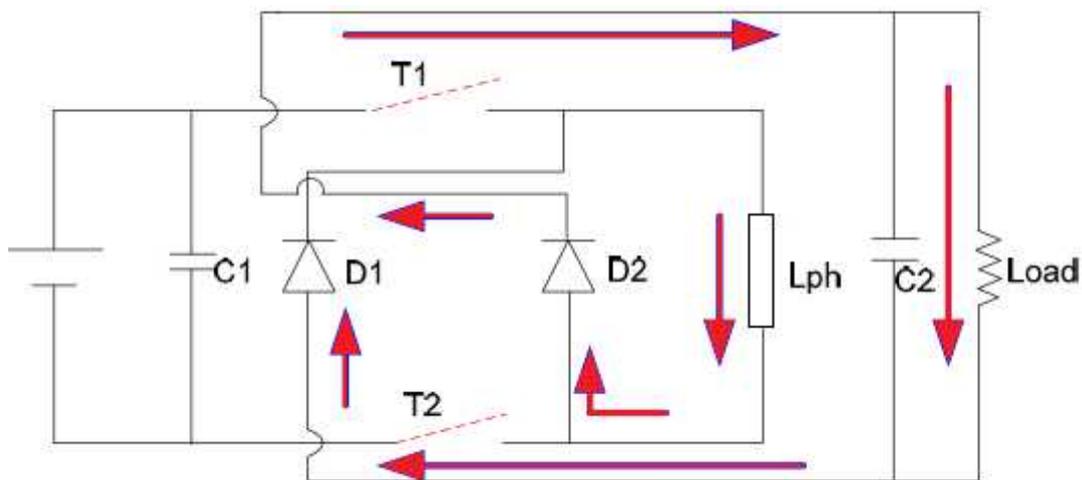


Fig.I.14 Circuit d'excitation séparée pour la GRV

I.9. LA METHODE DES ELEMENTS FINI (MEF)

Il existe de nombreuses méthodes disponibles pour modéliser la relation couple-courant, comme la logique floue, réseau de neurone artificiel (ANN) et l'analyse par éléments finis (MEF) et ainsi de suite. La méthode des éléments finis (MEF) a gagné une acceptation généralisée dans la modélisation analytique et l'analyse des performances de la MRV. De nombreux articles ont été publiés sur l'influence de la forme de pôle de rotor sur la caractéristique de couple statique et dynamique, déformation du stator lors de l'excitation et de l'excentricité du rotor. L'optimisation de la conception du MRV a été rapportée par Faiz, qui utilise la théorie non linéaire de production du couple [47,48].

Des auteurs [49] ont comparés la méthode analytique MEF pour le calcul du couple moyen à différents arc polaire et des combinaisons de pas polaires pour une valeur fixe de longueur d'entrefer. En outre, dans ce travail, il manque une analyse détaillée de la géométrie optimale des MRV pour différentes combinaisons de paramètres de conception.

Les résultats d'une analyse par éléments finis à deux dimensions menée sur un moteur à réluctance variable 8/6 pour étudier les effets de l'entrefer non uniforme sur l'ensemble établi des profils de couple ont été traités dans [50].

I.10. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de présenter l'état de l'art et le principe fondamental de la GRV, y compris la structure, le principe de fonctionnement, le convertisseur utilisé et aussi les modes de fonctionnement. Les caractéristiques de fonctionnement en génération décrivent la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique. Ces caractéristiques permettent également l'élaboration d'un modèle mathématique basé sur la tension aux bornes de l'enroulement de phase.

CHAPITRE II

*MODELISATIONS ET SIMULATION
DE LA GENERATRICE A
RELUCTANCE VARIABLE*

II.1. INTRODUCTION

Le principe de fonctionnement de la MRV est fondamentalement différent de celui des machines classiques (asynchrones et synchrones). Dans ces dernières, la production du couple électromagnétique est régie principalement par la loi de Laplace, du fait que les conducteurs du rotor sont placés dans le champ électromagnétique créé par le stator. Tandis que celui des MRV, est basé essentiellement sur la variation de l'énergie magnétique associée au déplacement du rotor. Les performances des MRV sont comparables à celles des autres machines sans balais. Par contre, ils ont l'inconvénient d'avoir des ondulations de couple élevées, cet inconvénient qui est dû tout simplement à leur principe de fonctionnement.

La génératrice à réluctance variable est devenue un candidat important pour différentes applications telles que le système démarreur/générateur dans des avions [51], des automobiles [52] ainsi que les générateurs associés aux turbines éoliennes [53]. 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 [54].

Cependant, 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 [55] a adopté le programme "SPICE" qui présente des limitations. La référence [56] emploie la technique de « programmation orientée objet » qui est très flexible mais très difficile à mettre en œuvre du fait qu'elle ait besoin du modèle mathématique complet du système ; la référence [57] introduit quelques modèles et fichier.m sous l'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 [58] 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 boites 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 est très court et le travail présenté offre une nouvelle approche pour les caractéristiques de la GRV.

Nous avons établi dans ce chapitre un modèle théorique d'une GRV 6/4. L'étude a porté sur les caractéristiques électriques, magnétiques et mécaniques de la machine. Ce modèle sera validé, par la suite, par une simulation sous MATLAB/SIMULINK. Comme application pratique de cette génératrice, nous l'avons associée à une turbine éolienne et simulé l'ensemble dans le dernier chapitre.

II.2. TECHNIQUES DE MODÉLISATION DE LA GRV

Il existe quelques ressources disponibles sur le développement du modèle de simulation pour la GRV. L'approche de modélisation est basée sur la façon dont les caractéristiques magnétiques de la machine sont représentés et comment il est utilisée dans l'équation de la tension de phase. Elle peut être classée comme : l'approche de flux, l'approche de l'inductance et aussi l'approche du courant de phase. Elle peut être élaborée soit sous forme d'un modèle linéaire ou non linéaire. La Fig.II.1 illustre la classification des techniques disponibles de modélisation. La méthode d'analyse peut être représentée par un ensemble d'équations à partir du flux ou le profil d'inductance tandis que les Look Up Table (LUT) utilise la caractéristique magnétique obtenu soit par la méthode des éléments finis (MEF) ou de l'expérimentale pour résoudre l'équation de la tension de phase.

Bien que le principe de fonctionnement de la machine à réluctance variable diffère entre la fonction en moteur et la fonction en génératrice, la base pour développer le modèle de simulation est similaire. La différence est toutefois dans les caractéristiques magnétiques où la plage de fonctionnement est destinée à générer au cours de la pente décroissante du profil d'inductance. Il n'existe pas assez de modèles de simulation compréhensifs pour la GRV par rapport au moteur à réluctance variable [30].

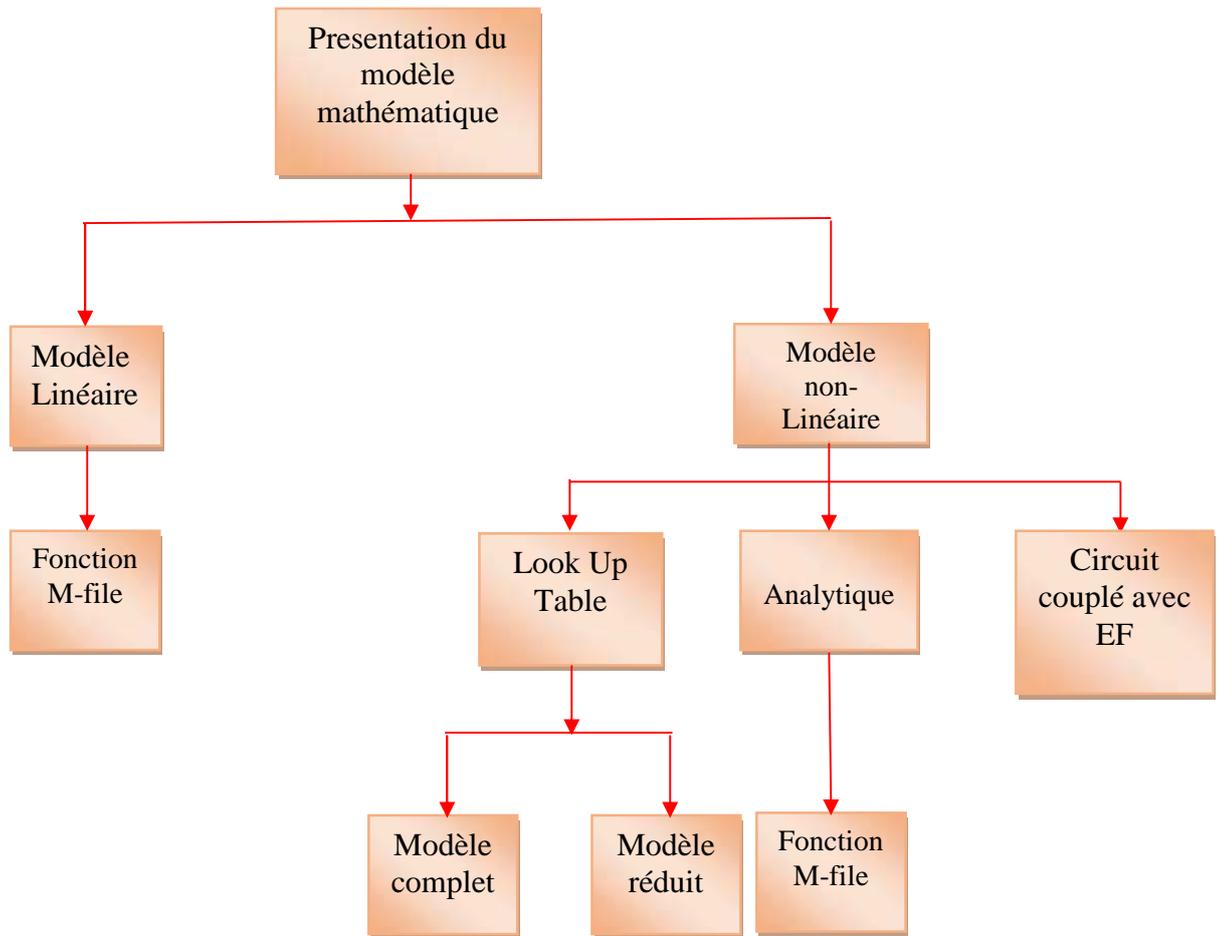


Fig. II.1. Classification des différentes méthodes pour la modélisation mathématique de la GRV

II.2.1. MODÈLE LINÉAIRE

Le modèle de simulation linéaire se base sur le profil d’inductance linéaire, cette méthode suppose un profil d’inductance linéaire avec une valeur minimale, Lmin et maximale Lmax, le profil de l’inductance peut être calculé en utilisant l’équation du flux linkage suivante :

$$\psi(n, i) = L(n) \cdot i \tag{II.1}$$

La méthode ne prene pas en considération le comportement non linéaire des matériaux d’où les caractéristiques magnétiques ne correspondent pas aux données réelles.

Cette méthode est utile pour comprendre les caractéristiques fondamentales de la machine, et non pas pour mesurer ou prédire ses performances [59].

II.2.2. LE MODÈLE LOOK UP TABLE (LUT)

L'approche de LUT peut être regroupée comme un modèle réduit et un modèle complet basé sur la façon dont les dérivées partielles de l'équation (I.8) sont résolues.

L'équation (I.8) détermine le courant de phase à partir de la courbe de magnétisation de flux linkage, ce qui nécessite l'utilisation d'une seule LUT électrique ; la courbe-i. Il nécessite deux paramètres d'entrée ; la position du rotor et le flux linkage qui est obtenu à partir de l'équation (II.3).

$$\lambda = \int_0^t (V - R \cdot i) dt \quad (II.3)$$

L'équation (I.8) peut être réarrangée pour obtenir le courant de phase comme suit :

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{\frac{d\lambda}{di}(i_j, \theta)} \left(V_j - R_j i_j - \dot{\lambda} \frac{d\lambda}{d\theta}(i_j, \theta) \right) \quad (II.4)$$

Et

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_j} \left(V_j - R_j i_j - i_j \frac{dL_j}{d\theta}(i_j, \theta) \dot{\theta} \right) \quad (II.5)$$

Les équations ci-dessus sont regroupées sous la catégorie de modèle complet. Les deux équations (II.4) et (II.5) impliquent la résolution de la dérivée partielle qui peut accumuler des erreurs.

La partie mécanique est déterminée à partir de l'équation (II.3) et elle est représentée comme un LUT du couple qui est calculé sur la base de la dérivée de la Co-énergie.

$$T_e = J \frac{d\dot{\theta}}{dt} + B\dot{\theta} + T_L \quad (II.6)$$

Où V est la tension appliquée aux bornes de l'enroulement de la phase, i est le courant de la phase, λ est le flux linkage de la bobine de phase qui est en fonction du courant et de la position de rotor, T_e et le couple total de la machine, J est le moment d'inertie du rotor, B est le coefficient de frottement du rotor, $\dot{\theta}$ est la vitesse angulaire et T_L et le couple de la charge.

Ceci fournit un couple instantané pour une phase tandis que la sommation du couple instantané pour chaque phase fournira le couple total de la machine. Les paramètres d'entrée du LUT de couple sont le courant et la position du rotor également.

Cette méthode suppose que chaque phase des enroulements soit symétrique, par conséquent la LUT peut être préparés en utilisant les mesures de l'un des enroulements.

II.2.3. METHODE BASE SUR L'INDUCTANCE ET LE FLUX

Cette méthode est basée sur l'inductance et le flux linkage, ces deux paramètres sont obtenus en utilisant les termes de la série de Fourier (SF).

Les coefficients des termes de SF sont déterminés en utilisant une fonction polynomiale.

L'approche considère normalement trois positions à savoir : alignée, intermédiaire et non alignée, déterminées soit à partir de la MEF ou de l'expérimentale.

Ces équations peuvent être programmées dans Simulink en utilisant le bloc fonction MATLAB [60, 61]. En raison des nombres sélectionnés de la position du rotor, cette méthode peut donner lieu à des erreurs d'estimation de fait que le trajet de flux diffère d'une position à l'autre.

II.2.4. CIRCUIT COUPLÉ AVEC LA MÉTHODE EF

La méthode implique le couplage du calcul du champ électromagnétique avec un circuit de simulation. Il n'y a pas assez de ressources sur le couplage entre deux logiciels différents en raison du temps long requis pour la simulation. L'utilisation de cette méthode nécessite de synchronisation du fonctionnement de la machine avec le circuit extérieur.

Le but de cette méthode est principalement pour étudier le comportement dynamique de la machine [62, 63] et également l'effet de la machine sous les conditions de défaut [64].

II.2.5. SÉLECTION DES TECHNIQUES DE MODÉLISATION

Le choix de la technique doit répondre aux critères suivants :

- Avoir la capacité de faire des changements sur les paramètres
- Capable d'ajouter le nombre de phases et de modéliser différentes topologies de la GRV
- Facile à modéliser.

Sur la base des critères ci-dessus et des discussions précédentes sur le processus du modèle électromagnétique, le modèle choisi dans ce chapitre pour représenter la GRV est basé sur le circuit de simulation couplé à la méthode des éléments finis avec l'utilisation par la suite de l'approche de LUT du courant de phase.

II.3. 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 [58]. 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.

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 cette thèse, 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 GRVDS 6/4 à double saillance). La topologie de son convertisseur de puissance est un demi-pont triphasé asymétrique en pont H. Le diagramme simplifié de la structure de la GRVDS 6/4 est illustré dans la Fig.II.2.

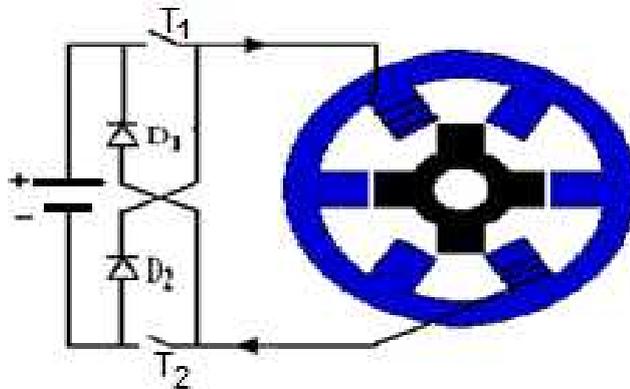


Fig.II.2. Structure classique d'une GRV rotatif à double saillance 6/4

Le rotor de la génératrice à réluctance 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 génération de l'énergie électrique.

La Fig.II.2 montre qu'il y a deux commutateurs T1 et T2, et deux diodes D1 et D2 dans chaque phase.

- Quand les deux interrupteurs **T1 et T2 sont fermés**, l'enroulement statorique est excité ; le système a absorbé l'énergie de la source d'excitation : phase de *magnétisation*.

- Quand **T1 et T2 sont ouverts**, l'enroulement libère l'énergie à travers les diodes D1 et D2, le système fournit l'énergie électrique aux charges externes : c'est la phase de *génération*.

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 Fig.II.2 indique la structure triphasée de la GRVDS 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 réluctance 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.

II.3.1. EQUATIONS ELECTROMAGNETIQUES

En négligeant l'inductance mutuelle entre les phases du stator, le circuit équivalent d'une machine à reluctance variable peut être exprimée de la façon suivante : la tension appliquée aux bornes d'une phase est égale à la somme de la chute de tension résistive et la variation du flux couplé. Cette tension est donnée par l'équation suivante :

$$\pm V_j = R.i_j + \frac{d\psi(\psi, i_j)}{dt} = R.i_j + \frac{d[L(\psi, i) i]}{d\psi} \tag{II.7}$$

V_j : Tension appliquée sur chaque phase.

i_j : Courant dans la phase j (j = A, B, C).

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

$\psi(\psi, i_j)$: Flux statorique totalisé.

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

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 du rotor et du courant de chaque phase. L'équation (II.7) peut être développée comme suit :

$$V_j = R.i + \frac{d\psi(n, i_j)}{di_j} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\psi(n, i_j)}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (II.8)$$

$\frac{d\psi(n, i_j)}{di_j}$: est défini comme étant l'inductance instantanée $L_j(n, i_j)$.

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

$$\check{\omega} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\check{\omega}_e}{N_r} \quad (II.9)$$

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

$$\psi(n, i) = L(n, i).i \quad (II.10)$$

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

On peut réécrire l'équation (II.8) sous la forme :

$$V_j = R.i_j + L(n, i_j) \cdot \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \check{\omega} \cdot \frac{dL(n, i_j)}{d\alpha} \quad (II.11)$$

Le terme dû à la variation d'inductance en fonction de la position ($i_j \cdot \check{\omega} \cdot \frac{dL}{d\alpha}$) représente la **force contre-électromotrice**.

Le circuit équivalent d'une machine à réluctance variable est illustré dans la Fig.II.3 :

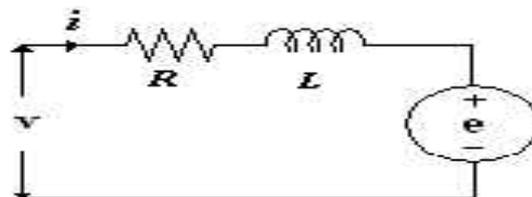


Fig.II.3. Circuit équivalent monophasé de la MRV dans la phase de magnétisation.

La multiplication par le courant instantané les deux côtés de l'équation (II.11) donne

$$p_i = V_j i_j = R.i_j^2 + L(n, i_j) \cdot i_j \frac{di_k}{dt} + i_j^2 \cdot \frac{dL(n, i_j)}{d\alpha} \quad (II.12)$$

Où p_i est la puissance instantanée d'entrée.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i_j) \cdot i_j^2 \right) = L(\theta, i) \cdot i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Remplaçant dans l'équation (II.12) :

$$p_i = R \cdot i_j^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i_j) \cdot i_j^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Cette équation montre bien que la puissance instantanée d'entrée est égale à la somme des pertes résistives données par $R \cdot i_j^2$, le taux de variation de l'énergie électromagnétique donné par $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i_j) \cdot i_j^2 \right)$ et la puissance dans l'entrefer qui est donnée par le terme $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt}$.

Mettant le temps en fonction de la position du rotor et la vitesse :

$$t = \frac{\theta}{\check{S}_m} \quad (\text{II.15})$$

La puissance dans l'entrefer devient :

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \check{S}_m \quad (\text{II.16})$$

La puissance dans l'entrefer est égale au produit du couple électromagnétique et la vitesse du rotor.

$$p_a = T_e \cdot \check{S}_m \quad (\text{II.17})$$

D'où vient l'équation du couple électromagnétique :

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (\text{II.18})$$

L'expression (II.18) montre que le convertisseur de la GRV 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 GRV 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.

Tout cela complète le développement du circuit équivalent et les équations qui évaluent le couple électromagnétique, la puissance dans l'entrefer et la puissance d'entrée du GRV.

II.3.2. 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 :

$$L_j(i, \theta_j) = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos(N_r \cdot \theta_j + f) \tag{II.19}$$

Où

$$L_0(i) = \frac{L_{\max}(i) + L_{\min}(i)}{2} \tag{II.20}$$

$$L_1(i) = \frac{L_{\max}(i) - L_{\min}(i)}{2} \tag{II.21}$$

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 [58,65]. La Fig.II.4 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 ($L_{\min} = 0.01H$).

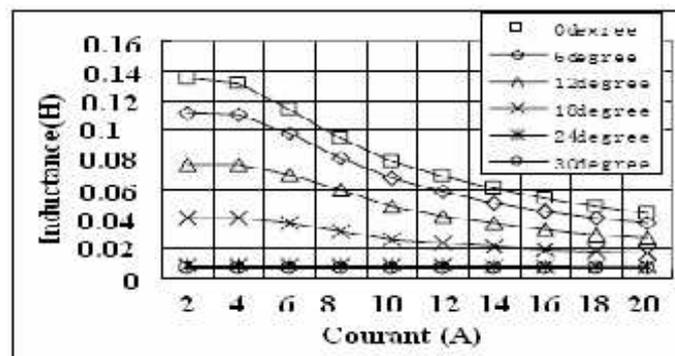


Fig.II.4 Relation entre l'inductance, la position du rotor et le courant de phase [62]

$L_{max}(i)$ 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.II.5 et l'expression (II.16).

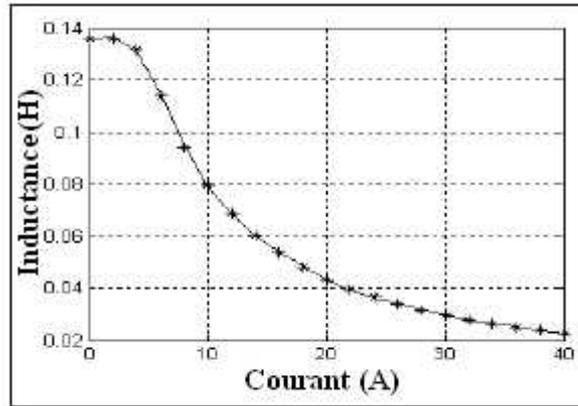


Fig.II.5 Courbe de fitting de $L_{max}(i)$

$$L_{max}(i) = \sum_{n=0}^3 a_n i^n = 0.136 - 0.0045.i + 0.005.i^2 - 0.0022.i^3 + 0.00035.i^4 \quad (II.22)$$

II.3.3. 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 :

$$T_e(\{j_1, \dots, j_n, n\}) = \frac{\partial W}{\partial n}(\{j_1, \dots, j_n, n\}) \quad (II.23)$$

Avec :

W : énergie,

$\{j\}$: Flux totalisé dans chaque phase.

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

$$T_e(\{j_1, j_2, j_3, n\}) = \frac{\partial W}{\partial n}(\{j_1, j_2, j_3, n\}) \quad (II.24)$$

Les équations mécaniques sont :

$$J \cdot \frac{d\check{S}}{dt} = T_e - T_r - F \cdot \check{S} \quad (\text{II.25})$$

Où :

J : moment d'inertie de la MRV

T_r : couple résistant

F : coefficient du frottement visqueux.

De la Co-énergie :

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot L(\theta, i) \cdot i^2 \quad (\text{II.26})$$

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

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (\text{II.27})$$

Cette équation 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 .

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

Pour tester la faisabilité du modèle proposé, un système triphasé 6/4 de la GRV est construit et simulé. Les paramètres nominaux de la GRV sont 4500 tr/min, 250 volts. La GRV a été simulée sous différentes conditions.

II.4.1. SCHEMA SYNOPTIQUE DU MODELLE

La Fig.II.6 représente le schéma synoptique du modèle globale.

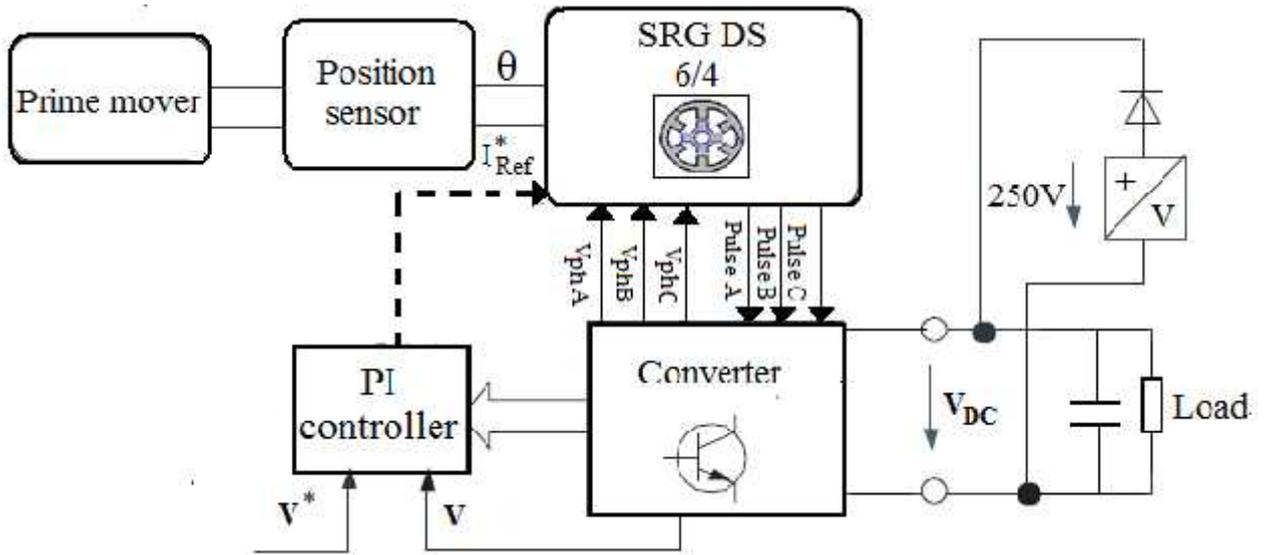


Fig.II.6. Modèle globale du système de la GRV

II.4.2. 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.

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_0 a été choisi, pour éviter ce cas de couple de charge nul.

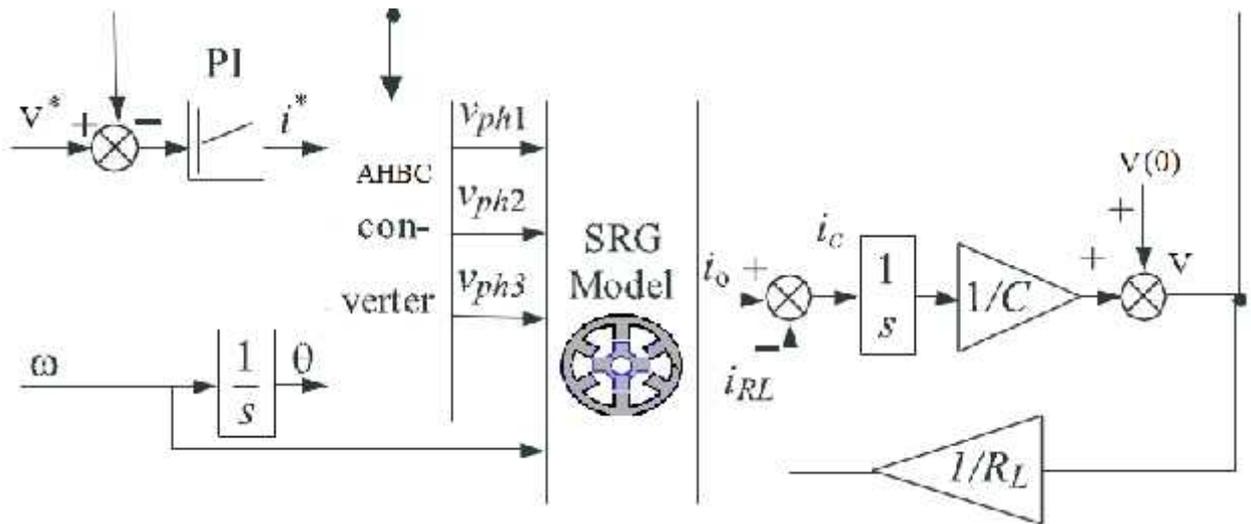


Fig.II.7 représentation du modèle d'une phase de la GRV

La machine à réluctance variable simulée avec le modèle mathématique non linéaire établi ci-dessus dont la Fig.II.7 représente une phase de la GRV est une génératrice triphasée dont la simulation numérique a été réalisée avec *SIMULINK* sous environnement *MATLAB* (R2008.b). Les angles optimaux des interrupteurs sont limités comme suit : 45° on < off 90° .

II.5. DESCRIPTION DU MODELE ELABORE SOUS MATLAB/SIMULINK

La Fig.II.8 représente le modèle complet de simulation d'une GRV 6/4.

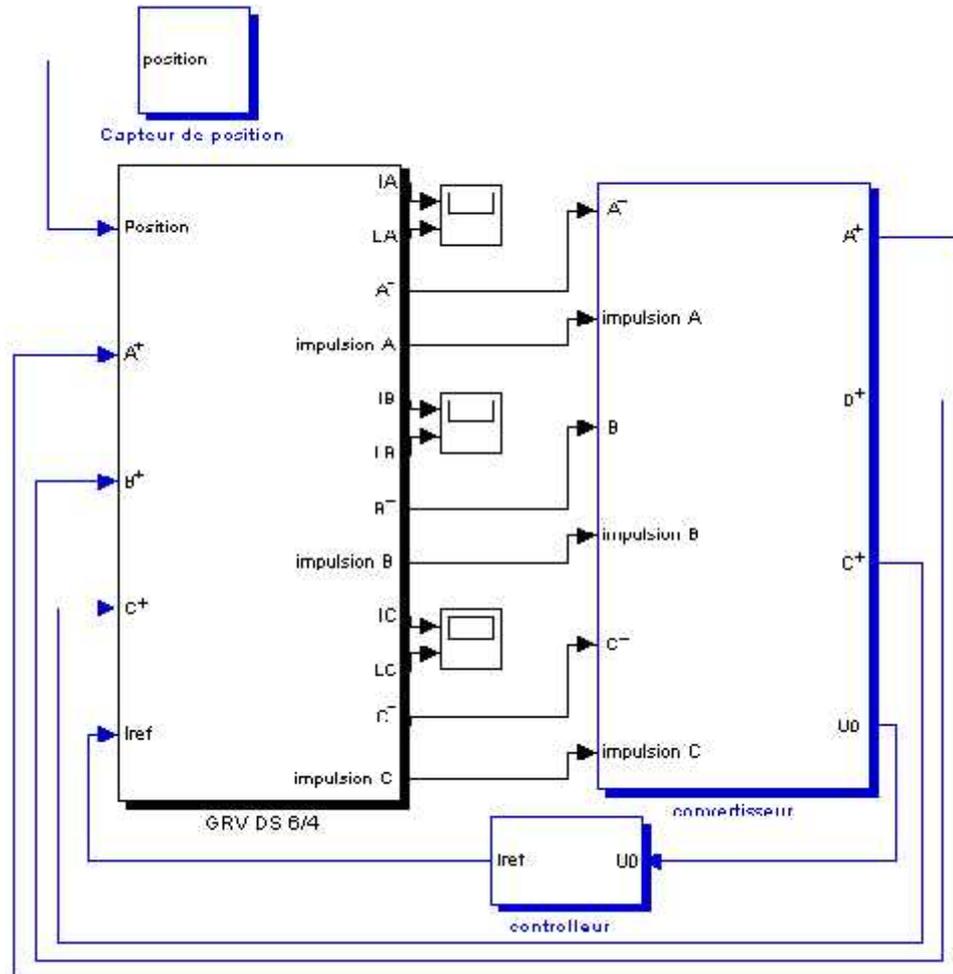


Fig.II.8 Modèle du système GRV- convertisseur-contrôleur-capteur simulé sous MATLAB/SIMULINK

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.

II.5.1. BLOC GRV

La structure interne du bloc GRV 6/4 est illustrée dans la Fig.II.9. 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.

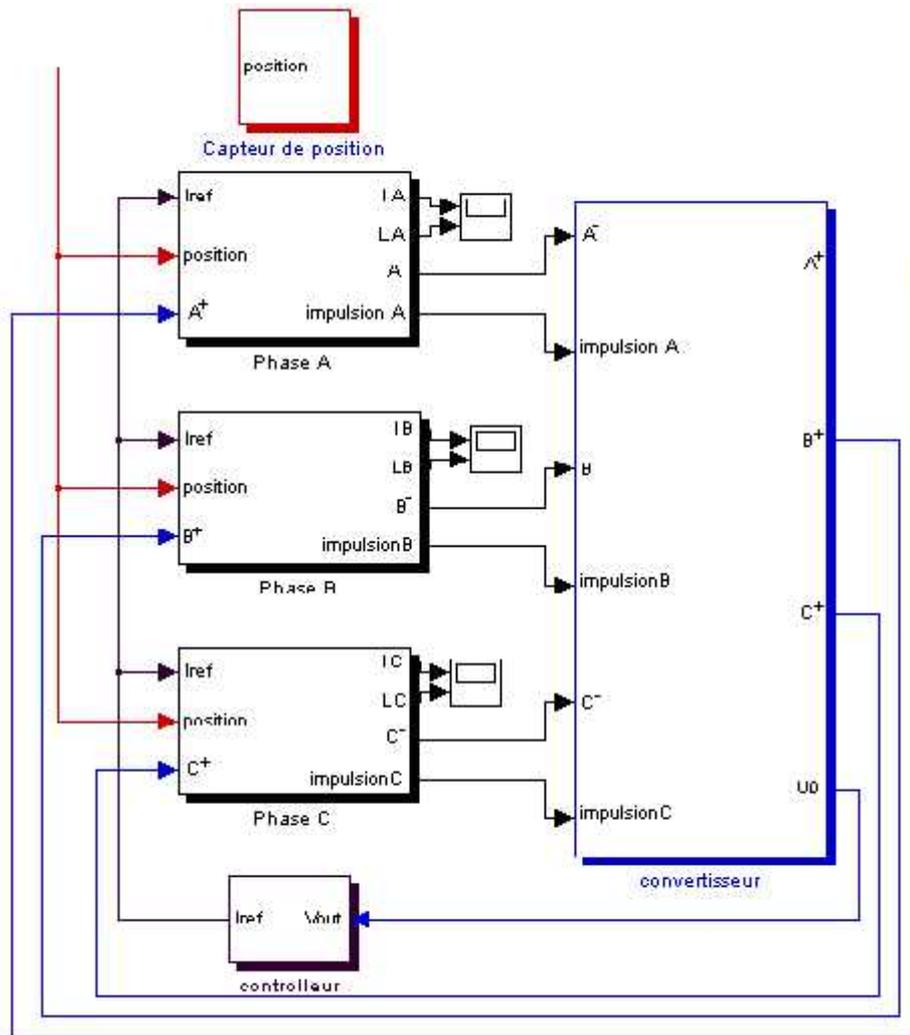


Fig.II.9 Structure interne du bloc GRV6/4

Dans la Fig.II.10, nous détaillons le contenu du bloc de la Phase A, les deux autres blocs étant identiques mais différents juste au niveau de la valeur du décalage angulaire où on prend 0° pour la phase A, s pour la phase B, et $2s$ pour la phase C, tel que [66] :

$$s = 2 \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \tag{II.28}$$

Dans ce bloc, nous pouvons également calculer l'inductance d'une phase en appliquant les formules (II.13) à (II.16).

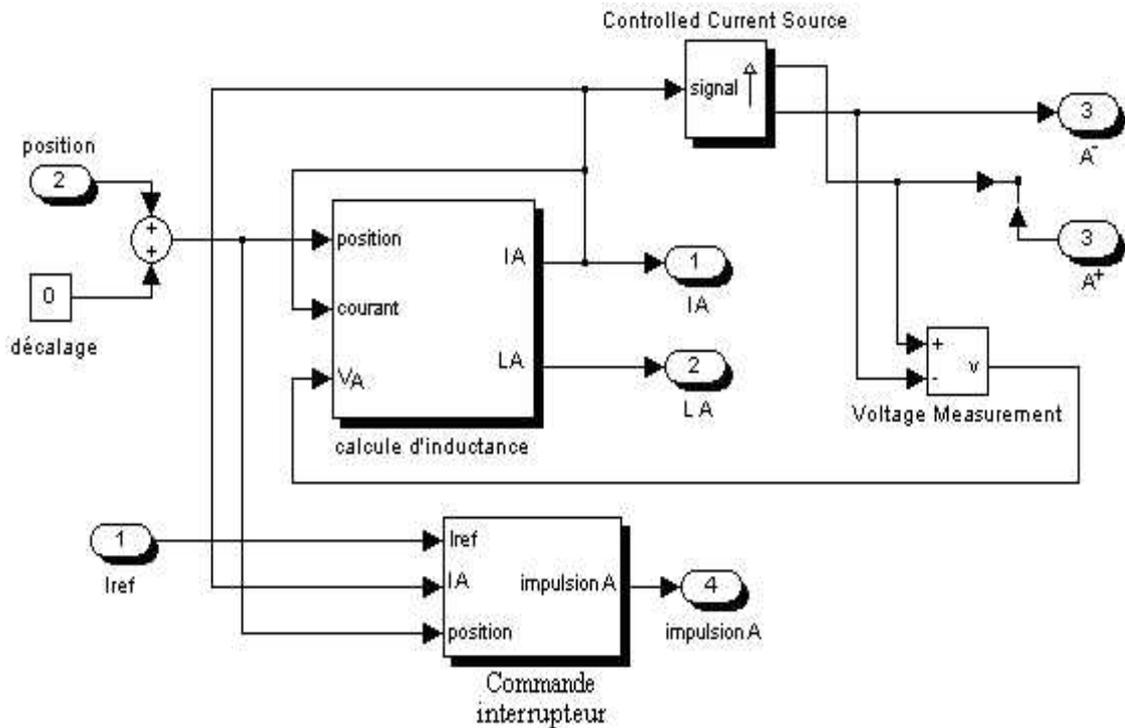


Fig.II.10 Intérieur du bloc Phase A.

De plus, en observant le contenu du bloc de calcul de l'inductance Fig.II.11, nous pouvons assimiler la méthode de calcul du courant.

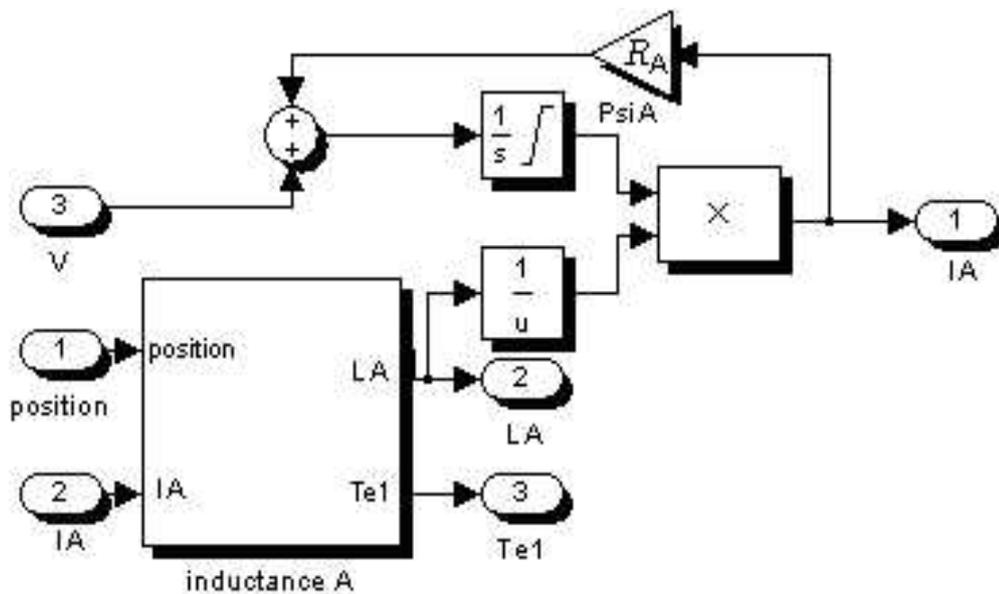


Fig.II.11 Calcul du courant d'une phase en vertu de la formule (II.1)

II.5.2. BLOC CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

II.5.2.1. circuit de puissance

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

Puisque les trois phases du convertisseur sont symétriques, on se contente de représenter Fig.II.12 uniquement la phase A.

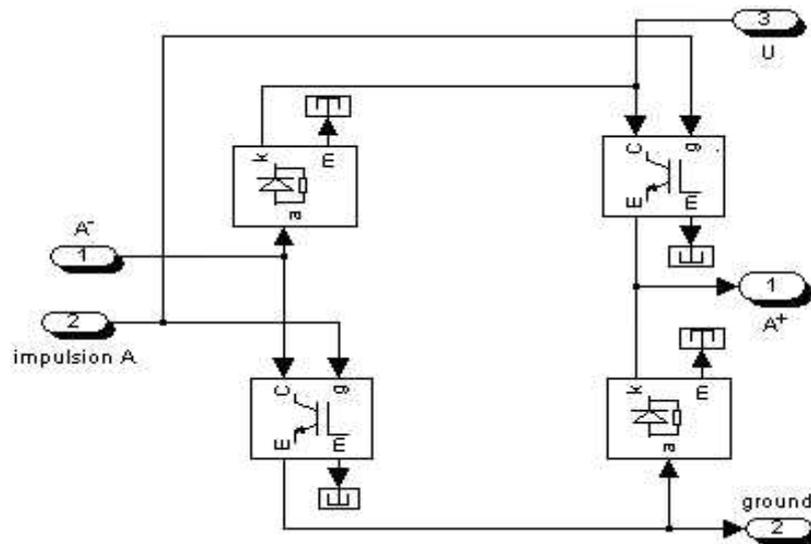


Fig.II.12 Circuit de puissance du convertisseur

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

II.5.3. BLOC BUS CONTINU

La Fig.II.13 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).

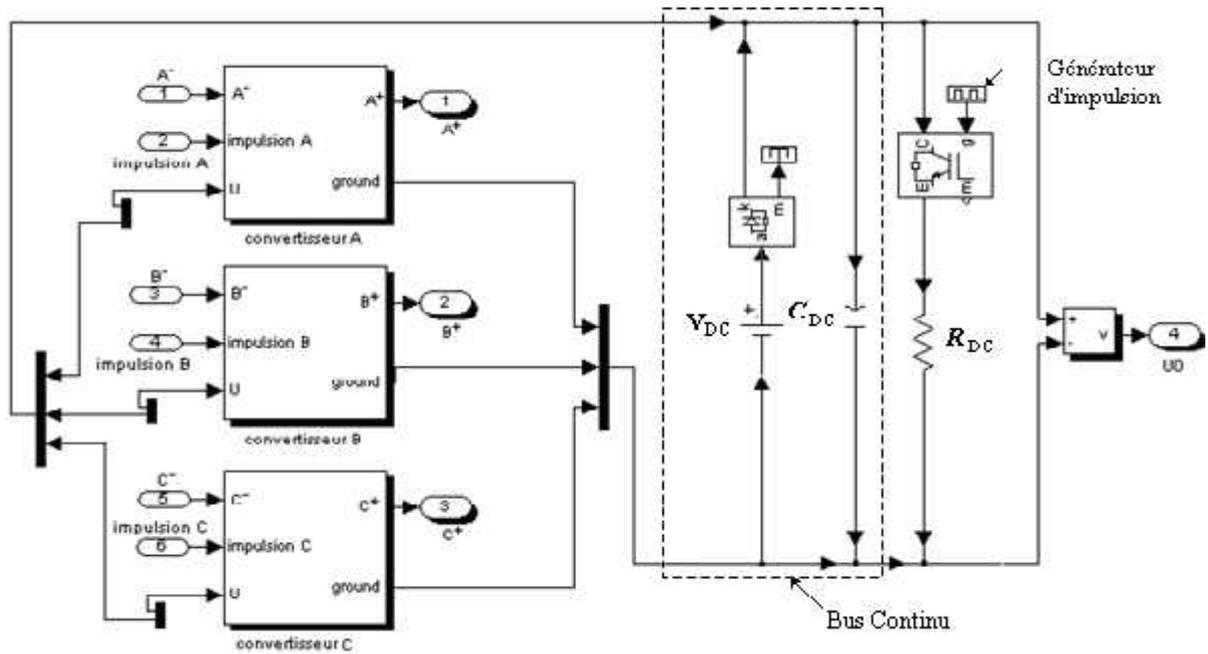


Fig.II.13 Convertisseur, bus continu et charge

II.5.4. LE CONTROLEUR

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.

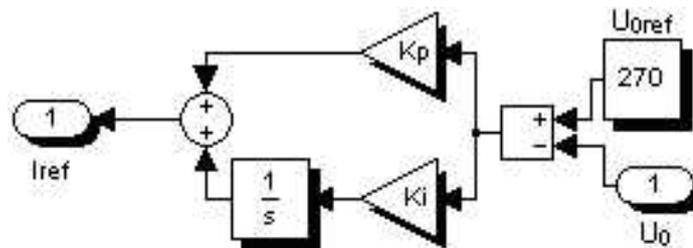


Fig.II.14 Le contrôleur

II.5.5. CAPTEUR DE POSITION

Le capteur de position est sensé capter la position du rotor de la GRV, son schéma-bloc est représenté Fig.II.15. 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.

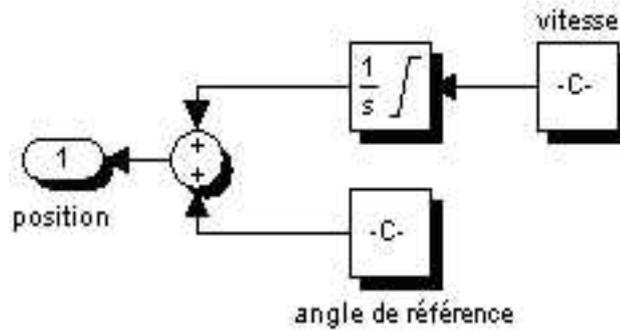


Fig.II.15 Capteur de position

II.6. RESULTATS DE SIMULATION DE LA GRV 6/4

Les figures suivantes illustrent les principaux résultats de simulation.

La Fig.II.16 montre la tension constante de la source continue (V=250 V).

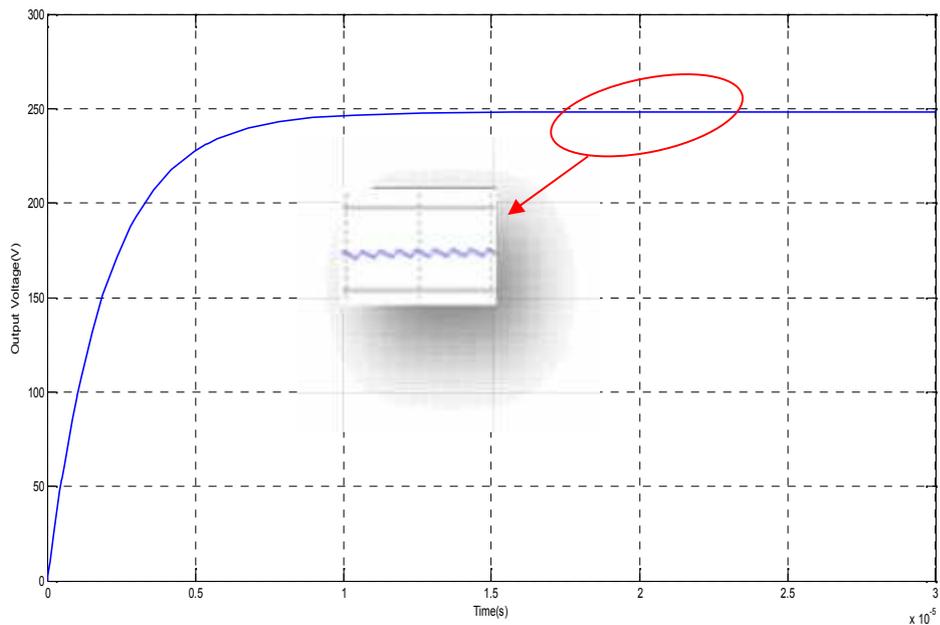


Fig. II.16 La tension de la source continue

La Fig.II.17 montre la tension du côté AC du convertisseur de puissance (phase A). C'est une tension alternative variant entre -V(-250V) et +V(+250V). Le niveau +250 V est obtenu lors de la conduction des IGBT T₁ et T₂ (phase de magnétisation), tandis que le niveau -250 V est obtenu lors de la conduction des diodes D₁ et D₂ (phase de génération).

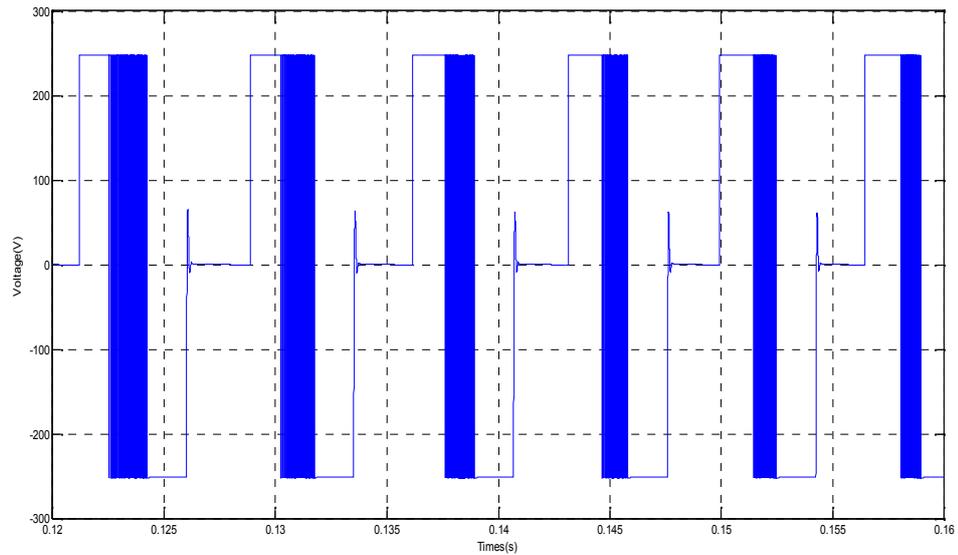


Fig.II.17 La tension de la phase A

La Fig.II.18 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.

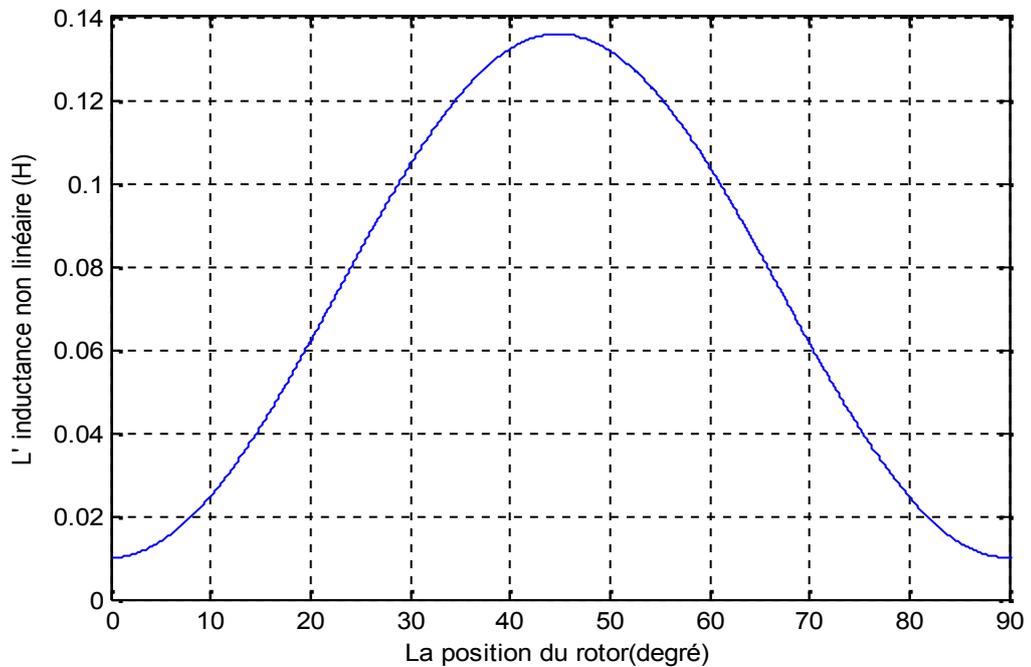


Fig.II.18 L'inductance de la phase A

Dans la Fig.II.19, 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 $2\theta_s = 60^\circ$.

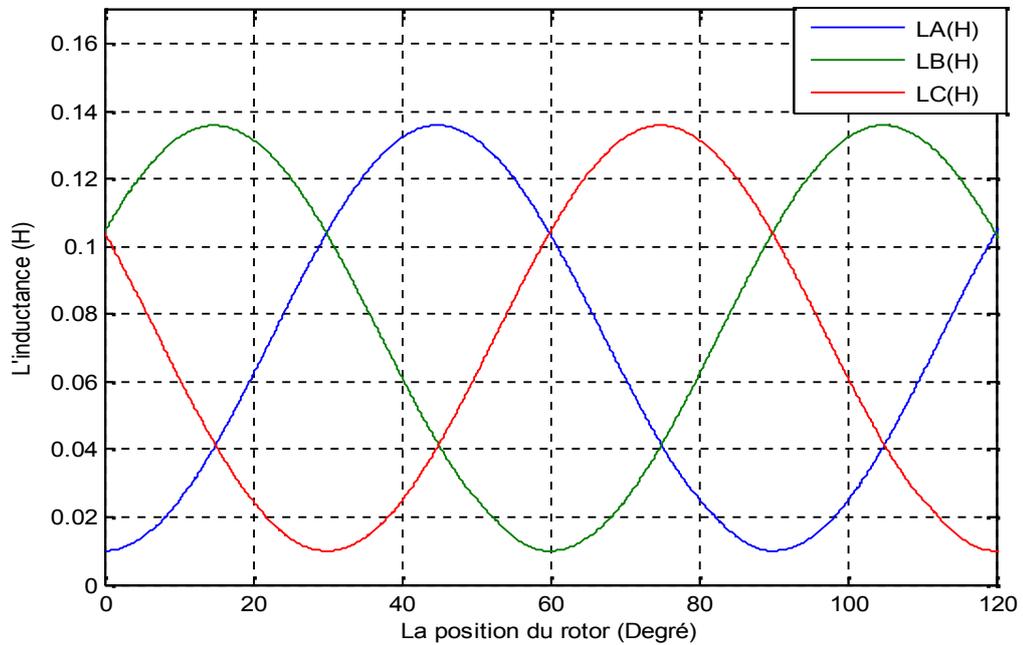


Fig.II.19 Les inductances des trois phases

Dans la Fig.II.20 on illustre l'allure du courant statorique de la machine (phase A). Le courant croît jusqu'à un maximum de 4.5A, décroît et s'annule, puis croît de nouveau. L'allure est semblable à celle qu'on a l'habitude de rencontrer dans la littérature [10,62,64,65].

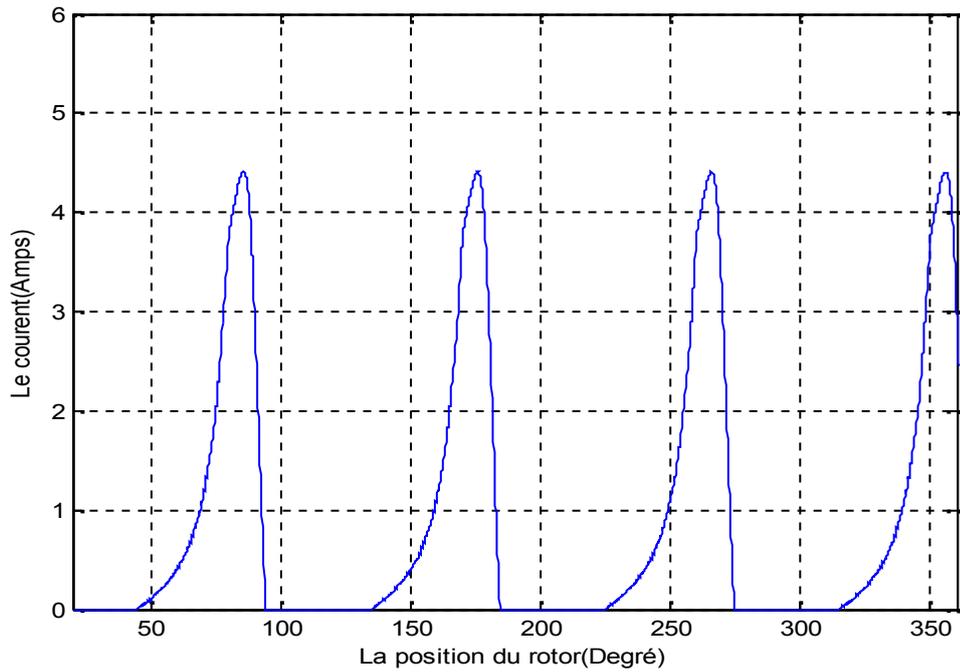


Fig.II.20 Le courant de la phase A pour une vitesse de 4500tr/min

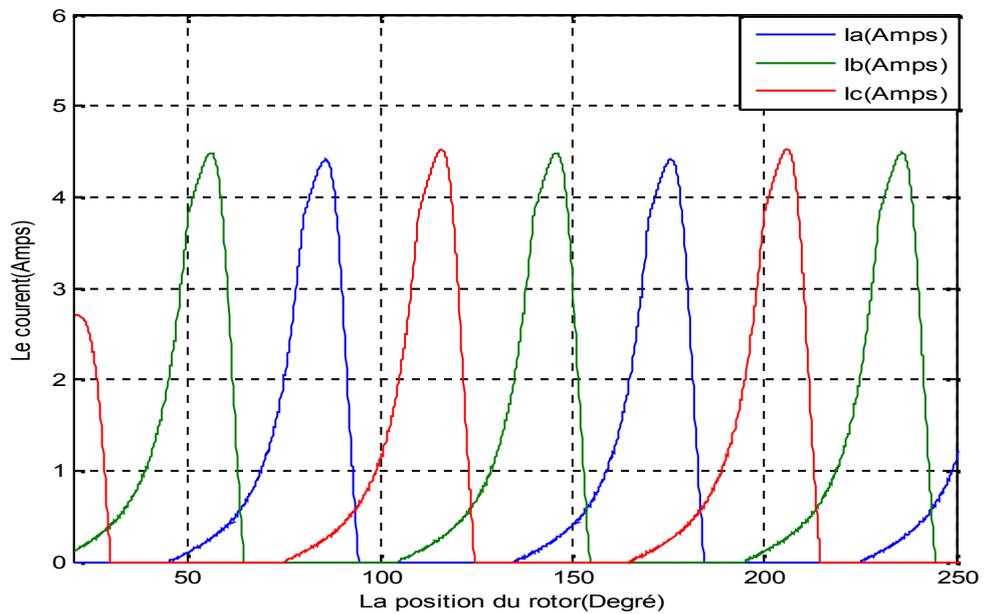


Fig.II.21 Les Courants des trois phases pour une vitesse de 4500tr/min

Dans la Fig.II.21, les courants des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de π est enregistré entre IA et IB, et un décalage de 2π 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.

La Fig.II.22 illustre les impulsions des IGBT T₁ et T₂ de la phase A du convertisseur.

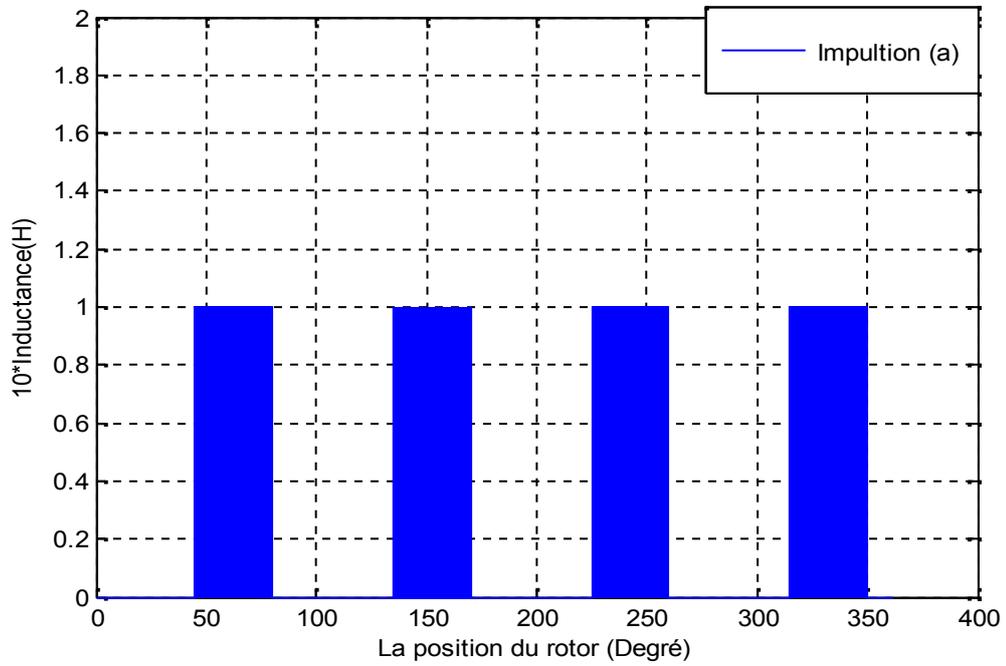


Fig.II.22 Les impulsions de la phase A

La Fig.II.23 montre que l'excitation de la GRV est durent la diminution de l'inductance.

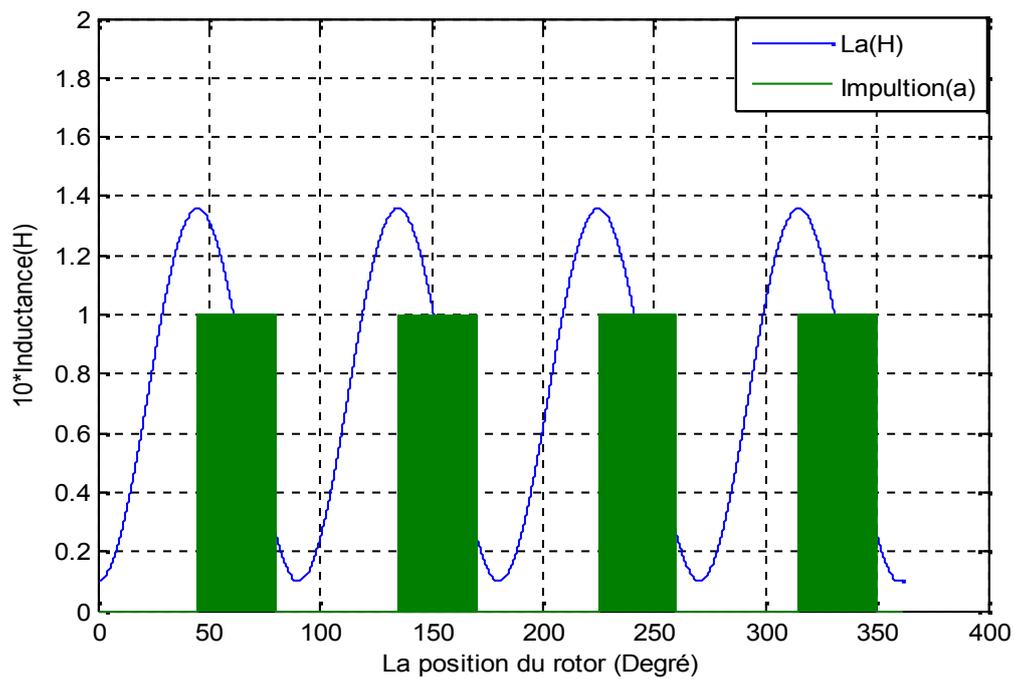


Fig.II.23 Excitation de la GRV durant la phase de diminution de l'inductance

La Fig.II.24 illustre la variation du flux par rapport au courant qui délimite la surface du cycle de l'énergie magnétique pouvant être transformée.

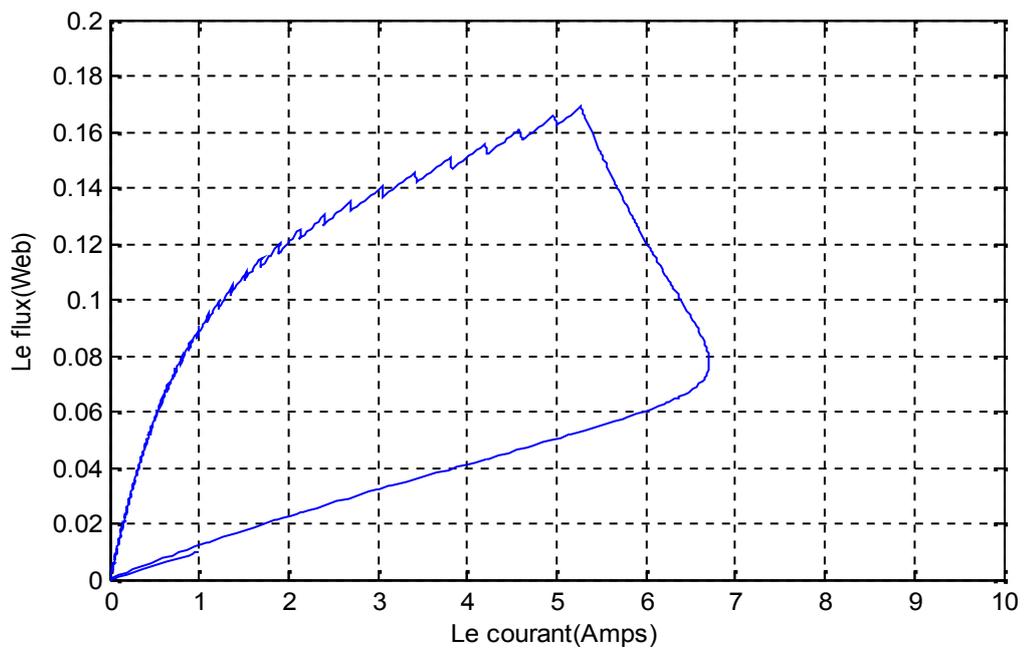


Fig.II.24 Le flux en fonction du courant

La Fig.II.25 les flux des trois phases en fonction de la position sont simultanément tracés.

Le flux croit jusqu'à un maximum de 0.098Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance (comme pour le cas du courant). Un décalage de π est enregistré entre PsiA et PsiB, et un décalage de 2π 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.

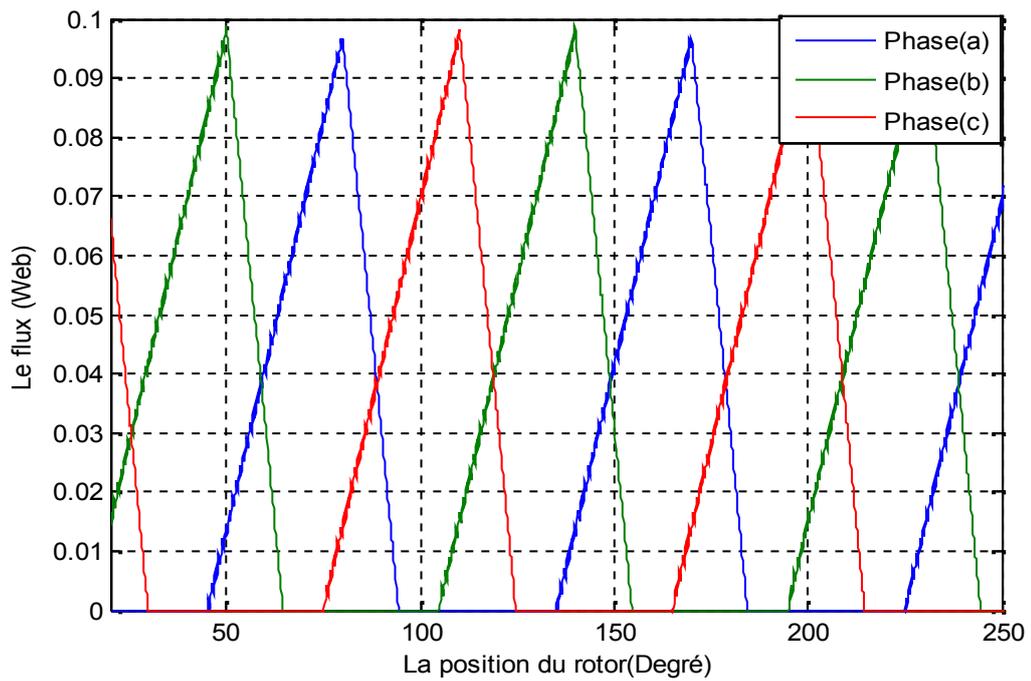


Fig.II.25 Les flux des trois phases

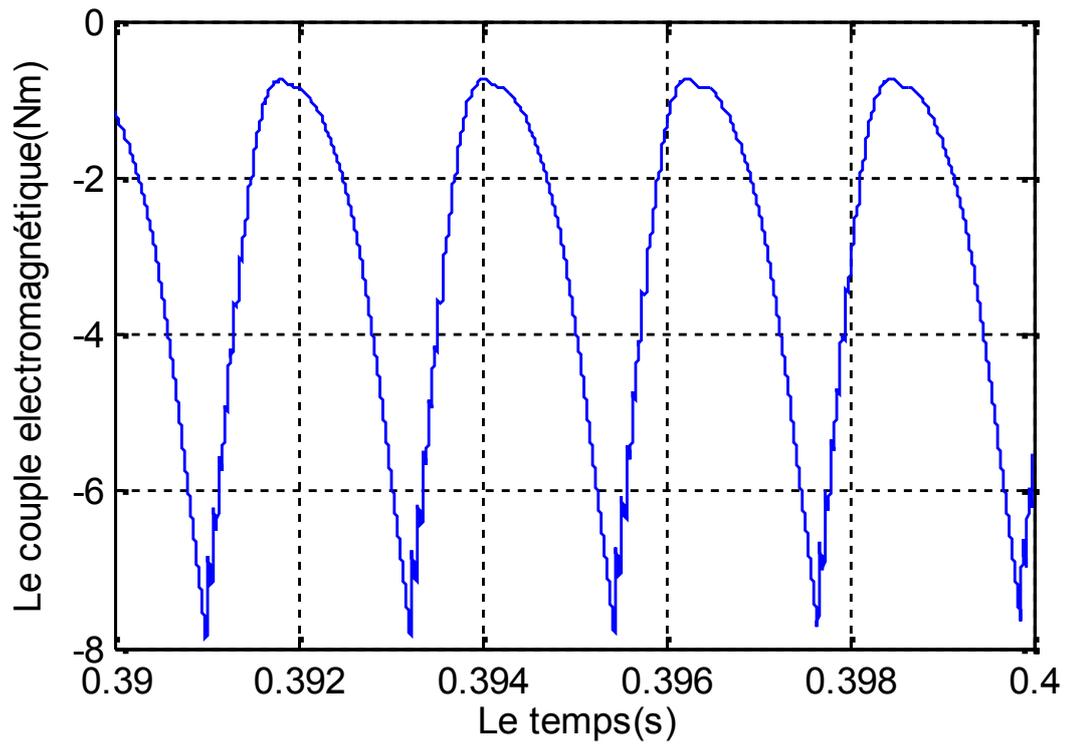


Fig.II.26 Le couple électromagnétique de la GRV

Dans la Fig.II.26 on illustre l'allure du couple électromagnétique de la machine. C'est une courbe qui oscille autour d'une valeur moyenne négative.

II.7. SIMULATION DE LA GRV 8/6

Additivement à la GRV 6/4, nous avons effectués une simulation similaire mais pour la GRV 8/6 possédant 8 pôles au stator et 6 pôles au rotor comme montré à la Fig.II.27, et ce, afin de généraliser le modèle de simulation exploité.

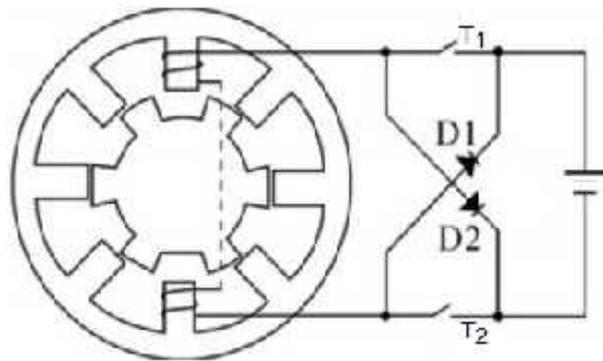


Fig.II.27 Diagramme simplifier de la GRV 8/6

II.7.1. CONVERTISSEUR DE PUISSANCE DE LA GRV 8/6

Le type de convertisseur de principe utilisé dans le générateur à réluctance variable est le convertisseur à demi-pont classique qui présente deux commutateurs de puissance et deux diodes par phase. Fig.II.28 montre la structure d'un onduleur en quatre phases, le principal avantage de cet onduleur est que chaque phase peut être réglée indépendamment.

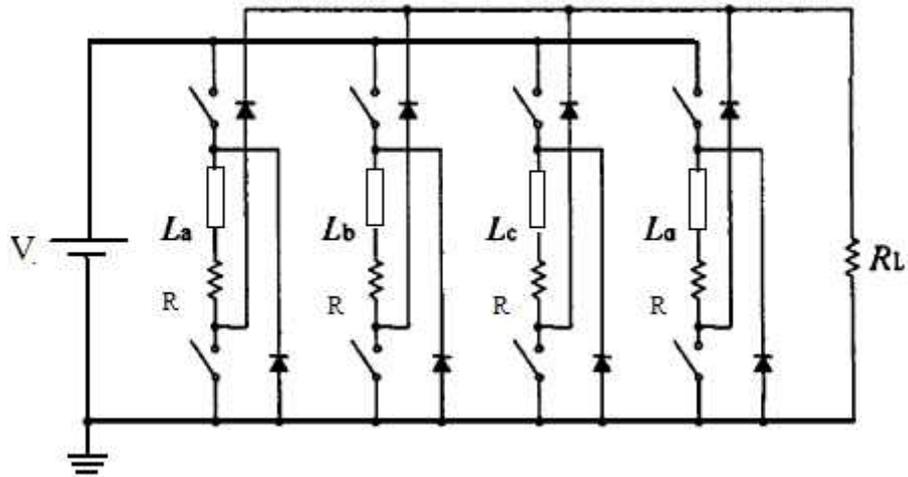


Fig.II.28 Convertisseur de puissance à quatre phases de la GRV

II.7.1.1. circuit d'excitation et charges

Le Modèle de simulation PSB de source d'excitation et la charge est montré à la Fig.II.29.

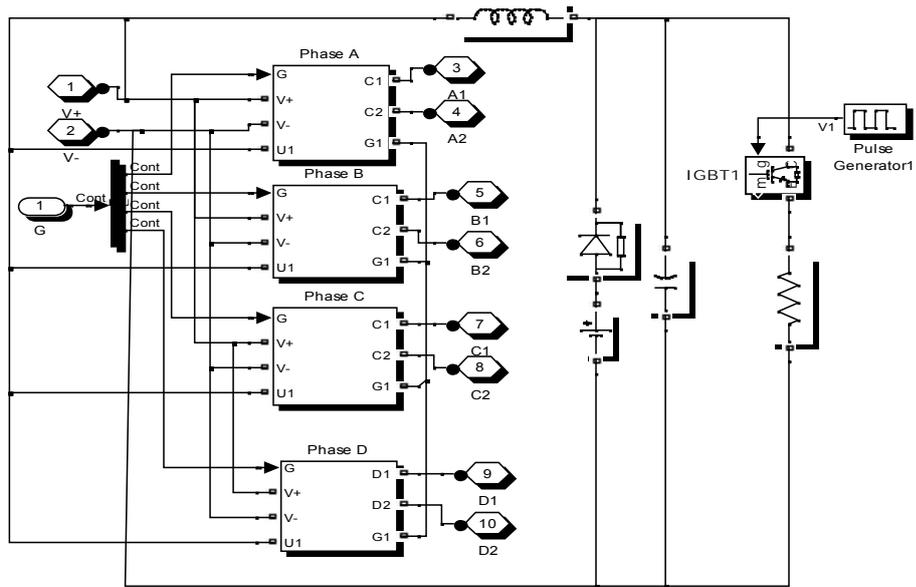


Fig.II.29 Modèle de simulation PSB de source d'excitation et la charge

II.8. MODELE DE SIMULATION DE LA GRV 8/6

Le modèle Globale de simulation de la GRV est représenté par la Fig.II.30.

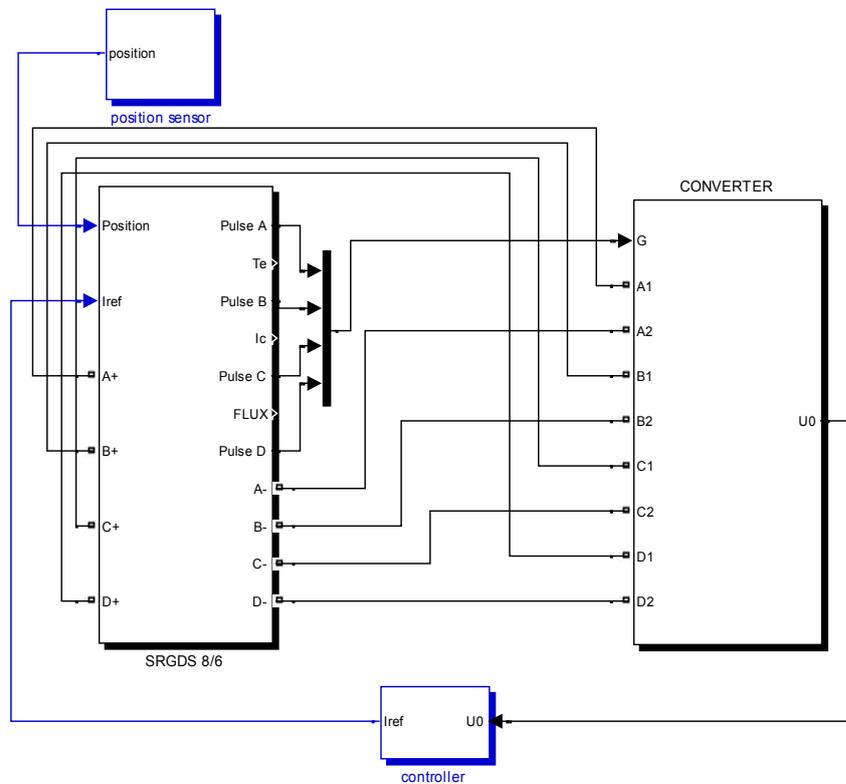


Fig.II.30 Modèle globale du système de GRV8/6

La Fig.II.31 représente la Structure interne du bloc GRV8/6.

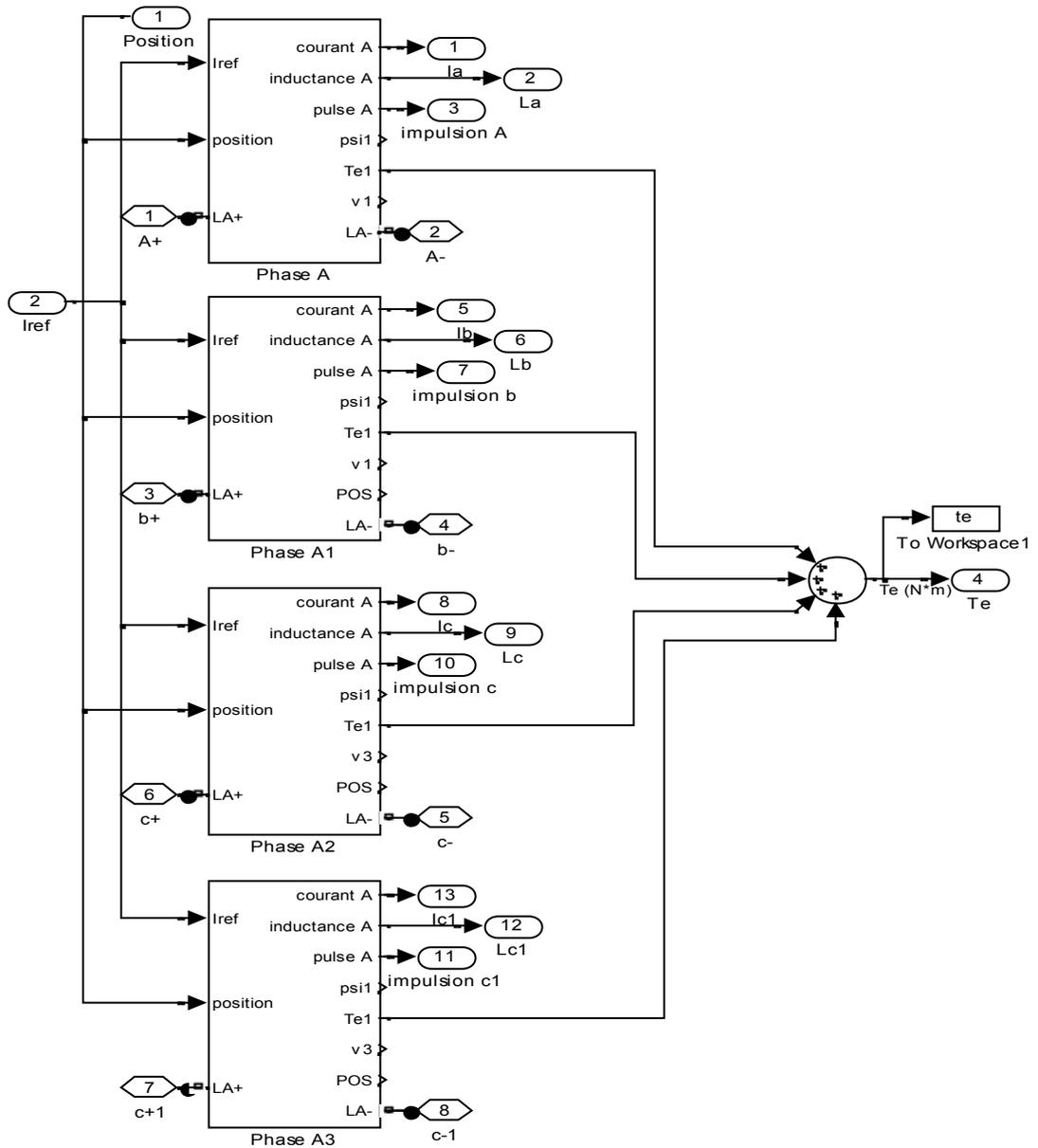


Fig.II.31 Structure interne du bloc GRV8/6

II.9. RÉSULTATS DE SIMULATION NONLINEAIRES DE LA GRV**8/6**

La Fig.II.32 montre la phase d'inductance non linéaire et sa variation lorsque la position du rotor change.

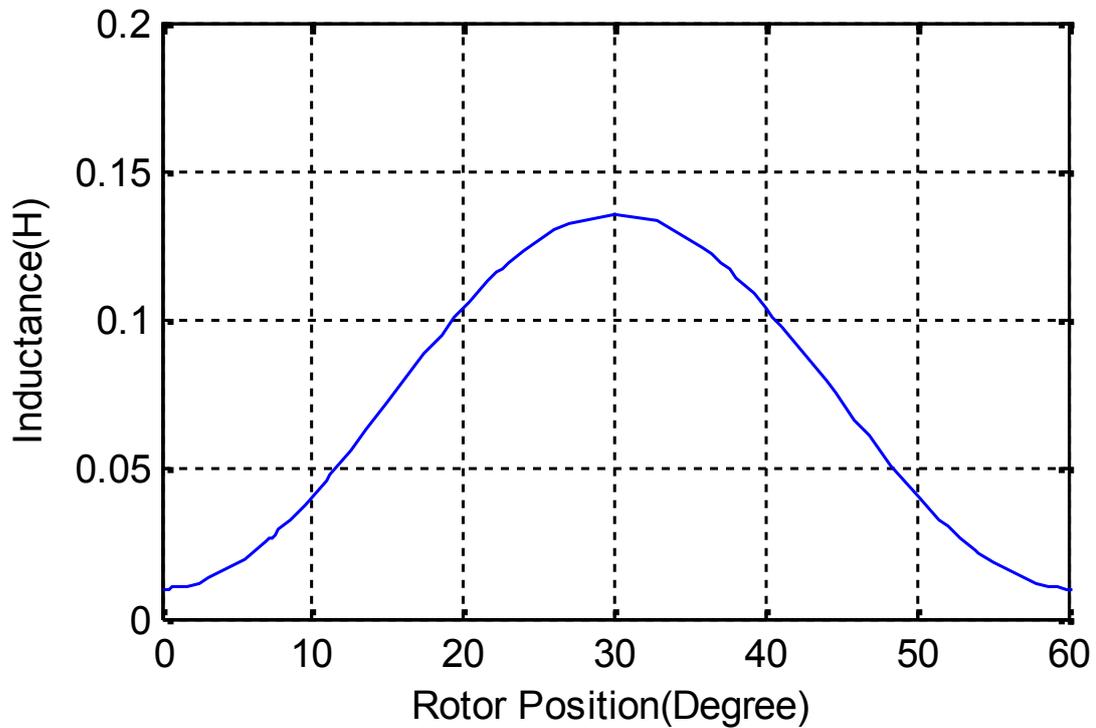


Fig.II.32 Inductance non linéaire (H)

Lorsque la vitesse augmente, le courant de phase est réduit et la capacité de production de GRV est diminuée.

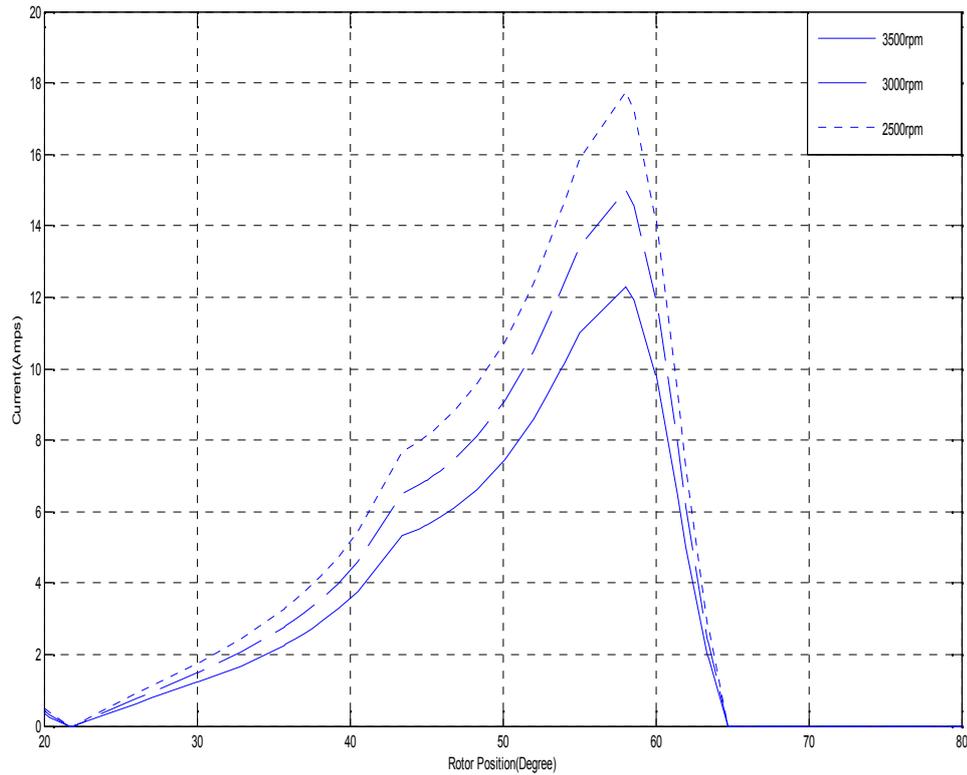


Fig.II.33 la phase des formes d'ondes de courant avec des vitesses différentes

Le processus d'excitation peut être contrôlé en réglant les angles turn-on et turn-off. Un avance dans de θ_{on} ou un retard de θ_{off} peut augmenter le courant d'excitation, et nous pouvons voir les effets dans la Fig.II.34 et la Fig.II.35, et à partir de ces deux figures, il apparaît que le courant d'excitation est considérablement sensible à θ_{off} . Généralement, dans ce contrôleur, θ_{off} est optimisé et fixé avec la vitesse du rotor, et l'énergie de sortie de la GRV est régulée en changeant l'angle θ_{on} .

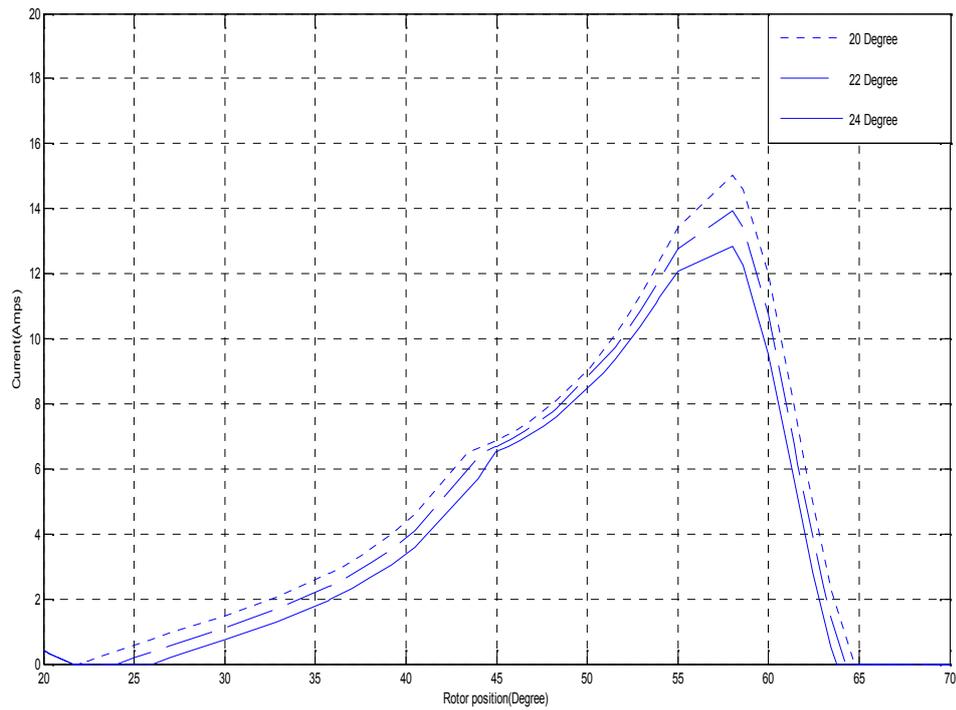


Fig.II.34 Courant de phase avec $\theta_{off} = 45^\circ$ et différent θ_{on} (vitesse = 3000 rpm)

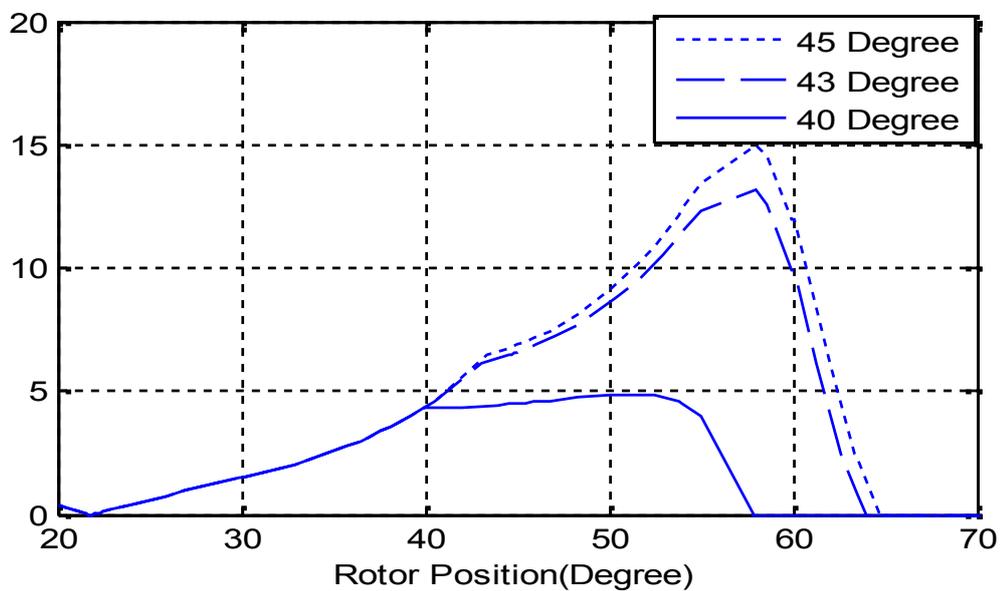


Fig.II.35 Courant de phase avec $\theta_{on} = 22^\circ$ et différent θ_{off} (vitesse = 3000 rpm)

Les figures II.36, II.37 et II.38 présentent les formes d'ondes du courant et du flux des trois phases ainsi que la tension d'une phase de convertisseur.

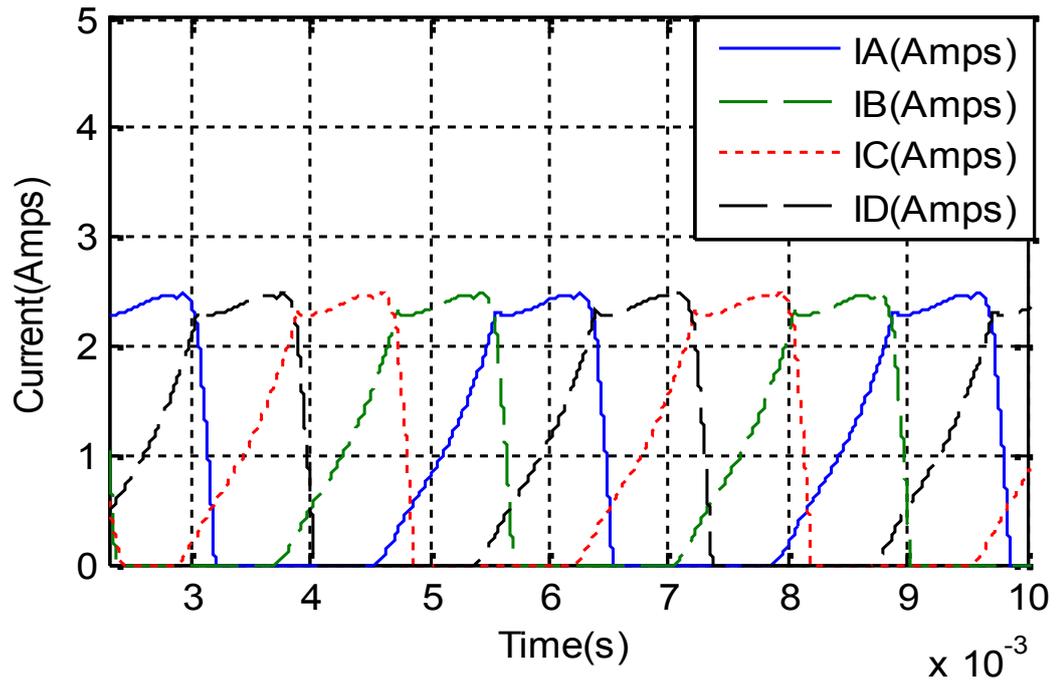


Fig.II.36 Courant de phase (A)

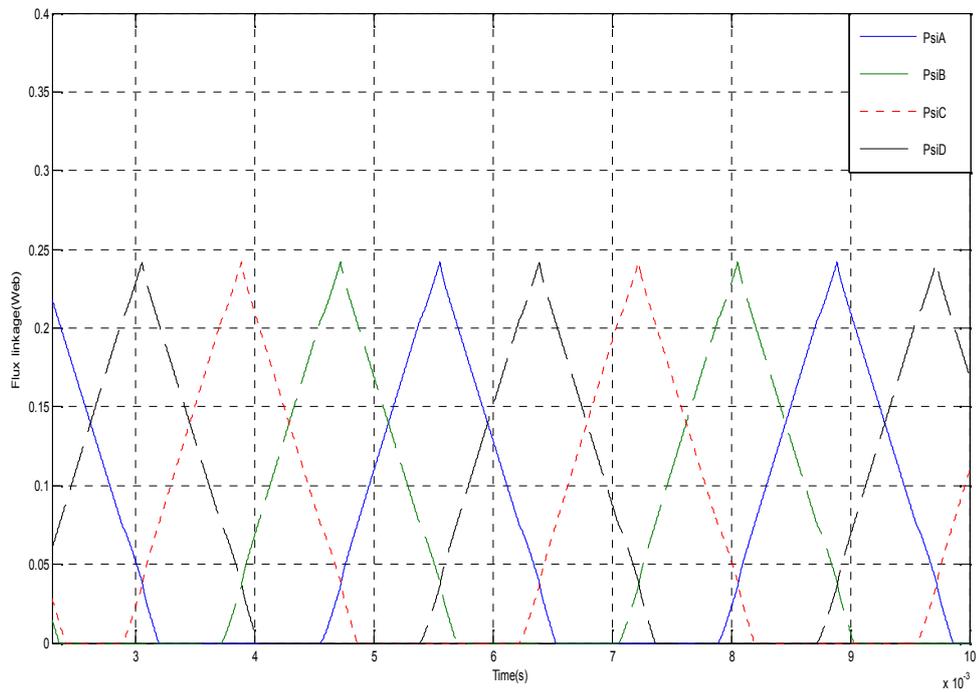


Fig.II.37 Le flux (Web)

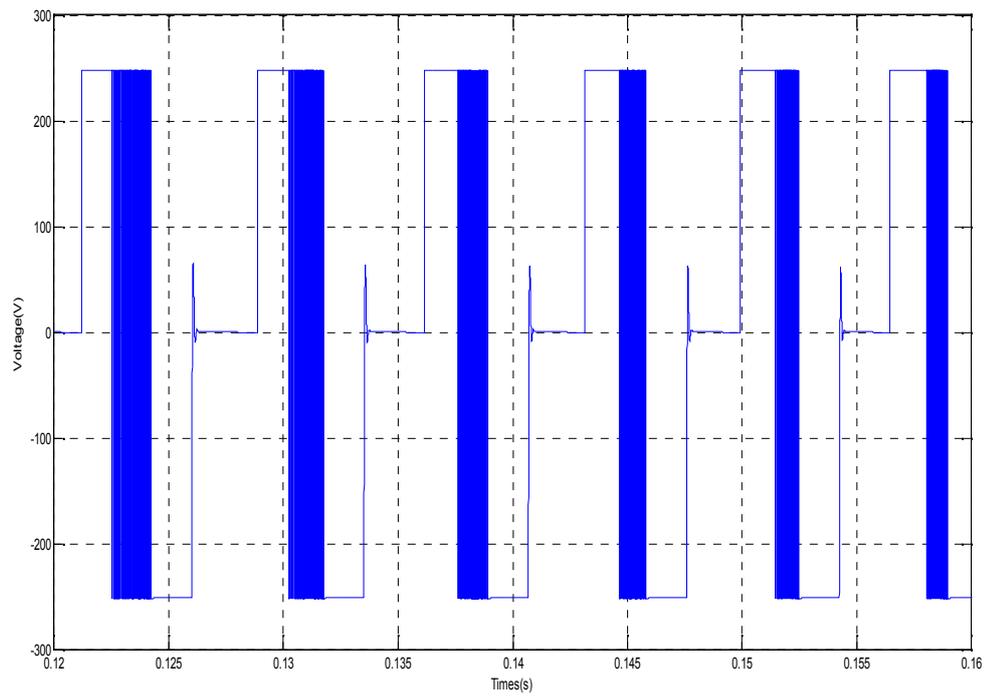


Fig.II.38 Tension de sortie d'une phase (V)

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

II.10. PARAMETRES DE SIMULATION DE LA GRV NON LINEAIRE

Les paramètres du GRV simulé sont les suivants :

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

Paramètre	Valeur Numérique
N_s	6
N_r	4
<i>on</i>	45°
<i>off</i>	80°
R	0.25
L_{min}	0.01 H
V	250 V
K_p	10
K_i	5
R_L	1140
Vitesse d'entraînement	4500 rad/s
<i>Angle de référence</i>	10°

II.11. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons traité la modélisation et la simulation complète de la GRVDS 6/4 et 8/6 après avoir expliqué son principe de fonctionnement en mode générateur.

Il existe beaucoup de caractéristiques non linéaires dans le système de la GRV. Lorsque les conditions de fonctionnement et les charges sont modifiées, les caractéristiques de certains composants dans le système de la GRV sera changé aussi. Donc, il est difficile et complexe à construire le modèle par une simple utilisation d'un modèle mathématique non linéaire, dans ce travail nous avons construit un modèle de simulation non linéaire complet du système de la GRV basé sur MATLAB/ SIMULINK.

Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants et montrent les caractéristiques principales représentant le comportement non linéaire de la GRV, ce qui valide le modèle proposé.

Le problème rencontré dans ce chapitre est les ondulations apparentes dans le couple développé par la machine, ce qui nous a conduits dans le prochain chapitre de faire une amélioration et optimisation dans le convertisseur de puissance et le contrôleur respectivement afin d'obtenir de meilleurs résultats.

CHAPITRE III

CONTROLE ET COMMANDE
OPTIMAL DE LA GRV

III.1. INTRODUCTION

La génératrice à réluctance variable a gagné une attention considérable par les chercheurs pour plusieurs raisons. Elle a également diverses fonctionnalités souhaitables incluant une structure simple et solide, présentant une facilité d'entretien, un petit moment d'inertie du rotor et un faible coût car la GRV n'a aucun enroulement au rotor et ne possède pas un aimant permanent.

Ce chapitre décrit la considération du circuit d'excitation de la génératrice à réluctance variable. Cependant, le circuit classique d'excitation de la GRV est un convertisseur à demi pont asymétrique (AHBC) dont la configuration est compliquée. Pour se faire nous utilisons dans cette partie une simulation par une modélisation non linéaire d'une génératrice triphasée à double saillance (GRVDS 6/4) excitée par un convertisseur simple et économique connu sous le nom SRC (Suppression Resistor Converter) avec un contrôleur de haute performance. Tel système donne de meilleurs résultats par rapport aux systèmes qui combinent entre un contrôleur PI et un convertisseur AHBC comme il a été montré au chapitre précédent.

La complication de la modélisation de la machine à réluctance variable, et la difficulté dans l'élaboration de stratégies de contrôle, vient du fait que l'inductance de la machine n'est pas uniquement en fonction de la position du rotor, mais aussi en fonction du courant d'excitation.

La plupart des études sur ce type de machine, ont surtout portées sur le mode de fonctionnement moteur alors que le mode générateur, assez marginal au début, commence à intéresser les chercheurs.

La conception et la mise en œuvre du système de contrôle est donnée à partir des caractéristiques non linéaires de l'inductance de la machine en fonction de la position du rotor pour une excitation fixe. La vitesse, et la nécessité de minimiser les ondulations du couple et de tension prennent une place dans cette étude.

III.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR DE PUISSANCE [67, 68]

Afin de générer du courant avec une machine à réluctance 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 $i \cdot \dot{\theta} \cdot \frac{dL}{d\theta}$ est négative et va permettre de générer de la puissance électrique.

Cependant, du fait que l'on impose une tension en créneaux aux bornes de chaque phase comme montré à la Fig.III.1, 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} .

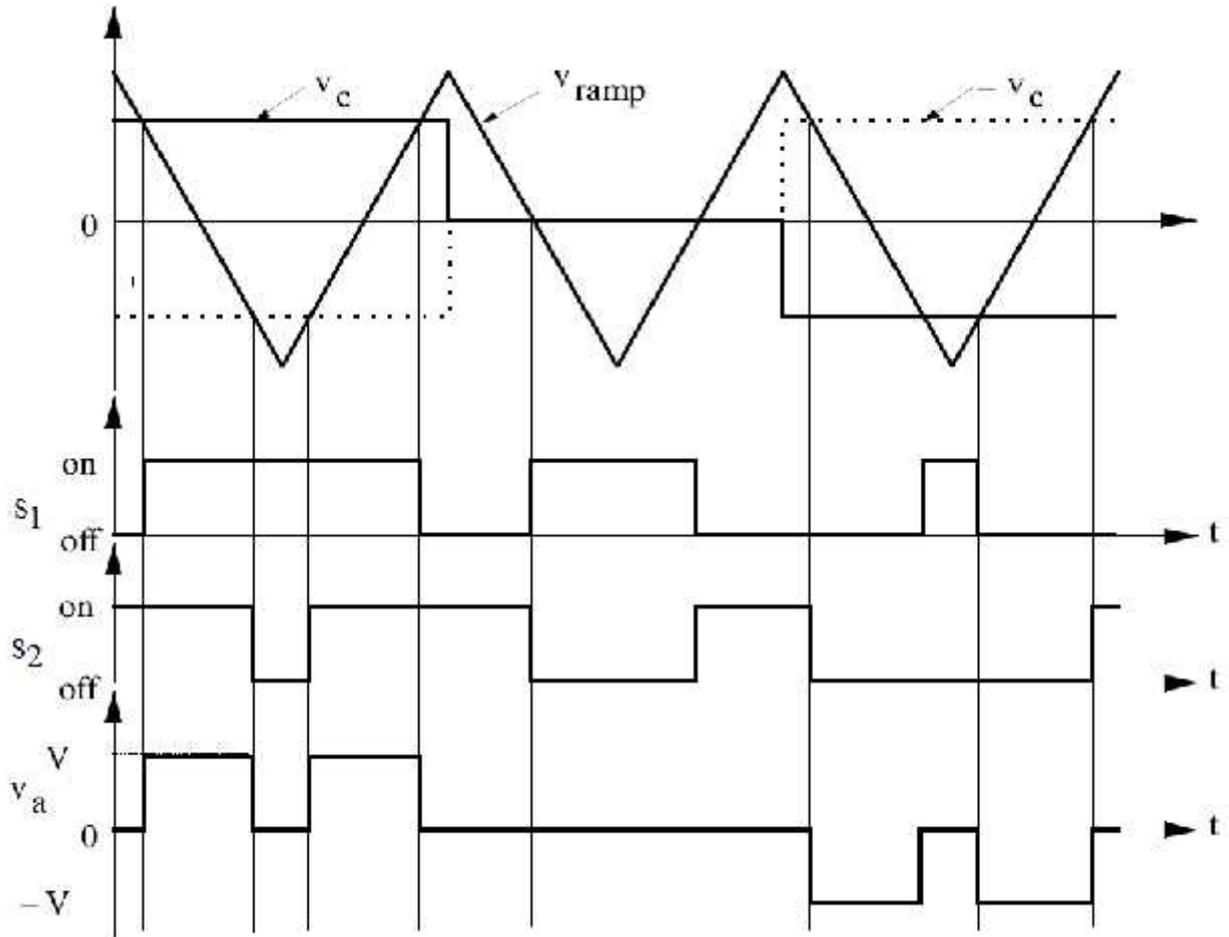


Fig.III.1 stratégie de commutation unipolaire.

Ce convertisseur fournit une tension de la même polarité que le signal de commande.

Cette stratégie double effectivement la fréquence de changement contribuant à la réduction de l'ondulation dans le courant et par conséquent à la réduction des ondulations du couple. En raison de ces avantages, cette stratégie de commutation est idéale pour le contrôle performant du courant et du couple des systèmes de la GRV. La commutation unipolaire est possible seulement dans des convertisseurs qui peuvent fournir des tensions de sortie

bidirectionnelles et peuvent donc ne pas être possibles avec d'autres types de convertisseurs n'ayant pas cette caractéristique. L'algorithme pour la commutation unipolaire est comme suit :

$$v_a = \begin{cases} V, & i_a^* > 0, & v_c \geq v_{ramp} & \& & -v_c < v_{ramp} \\ -V & & v_c < v_{ramp} & \& & -v_c \geq v_{ramp} \\ 0 & & \text{ailleurs} & & \\ -V, & i_a^* < 0, & v_c \geq v_{ramp} & \& & -v_c < v_{ramp} \\ V_{dc} & & v_c < v_{ramp} & \& & -v_c \geq v_{ramp} \\ 0 & & \text{ailleurs} & & \end{cases}$$

Où v_c est la tension de contrôle, v_{ramp} est la tension de la fréquence porteuse, et v_a est la tension de sortie de la phase du convertisseur (c.à.d, la tension d'entrée de l'enroulement de phase).

Le convertisseur asymétrique est idéal pour des applications à haute puissance. Un des défis dans ces applications est que les pertes de commutation doivent être réduites au maximum.

Le convertisseur le plus couramment utilisé avec la GRV est le convertisseur classique à demi-pont qui a deux interrupteurs de puissance et deux diodes par phase. La structure du convertisseur triphasé est déjà illustrée par la Fig.I.11, le principal avantage de cet onduleur est que chaque phase peut être contrôlée indépendamment.

III.2.1. LES TROIS PHASES DE FONCTIONNEMENT

A. phase d'excitation

Est la phase ou durant la décroissance de l'inductance les interrupteurs du convertisseur soit fermés (et les diodes bloquées), ce qui produit à sa sortie une tension positive (+ V_{DC}).

Au cours de cette phase, S_1 and S_2 sont en marche d'où le circuit équivalent suivant :

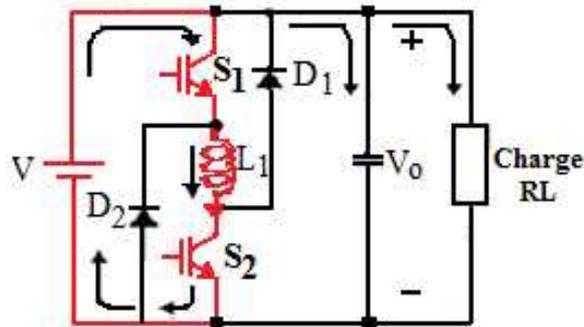


Fig.III.2.a Mode d'excitation

B. phase de roue libre

Au début, les chutes de tension des RL peuvent conduire à la diminution du courant des enroulements. Pendant une vitesse élevée et une tension de la source continue plus importante, la durée de ce mode augmentera.

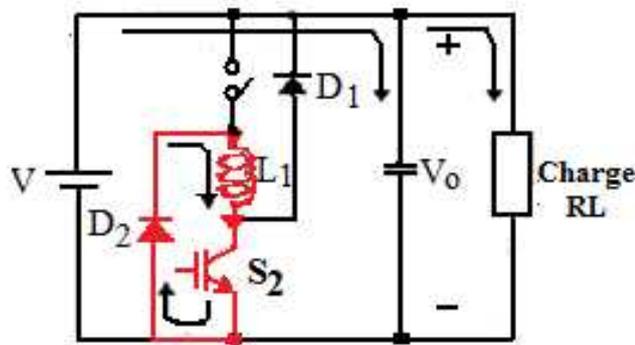


Fig.III.2.b Mode de roue libre

C. phase de génération

Pendant la phase de génération, tous les deux interrupteurs sont éteints avec le circuit et le chemin du courant est montré dans la Fig.III.2.c. Cette action va imposer une tension négative $-V_{DC}$ lors de la phase active de stator, à ce moment, l'énergie mécanique du moteur est convertie en énergie électrique. L'équation de la tension de phase d'enroulement dans ce mode peut être écrite :

$$-V_0 = R.i + L.\frac{di}{dt} + e, e < 0 \tag{III.1}$$

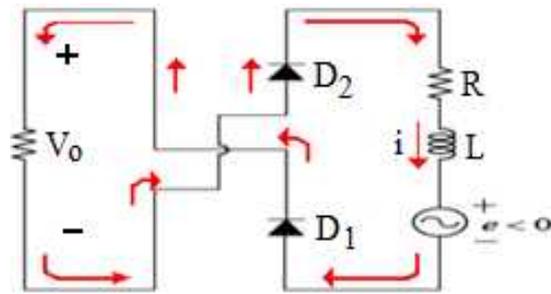


Fig.III.2.c Mode de Génération

Donc, le résultat obtenu à la sortie du convertisseur est une tension en créneaux avec deux limites (+ V) et (- V).

Afin d'assurer que la machine fonctionne en génératrice (donc un couple négatif c.-à-d., la dérivée de l'inductance est négative), il faut que les interrupteurs (IGBT) soient fermés seulement pendant de décroissance de l'inductance comme il est montré à la Fig.III.3.

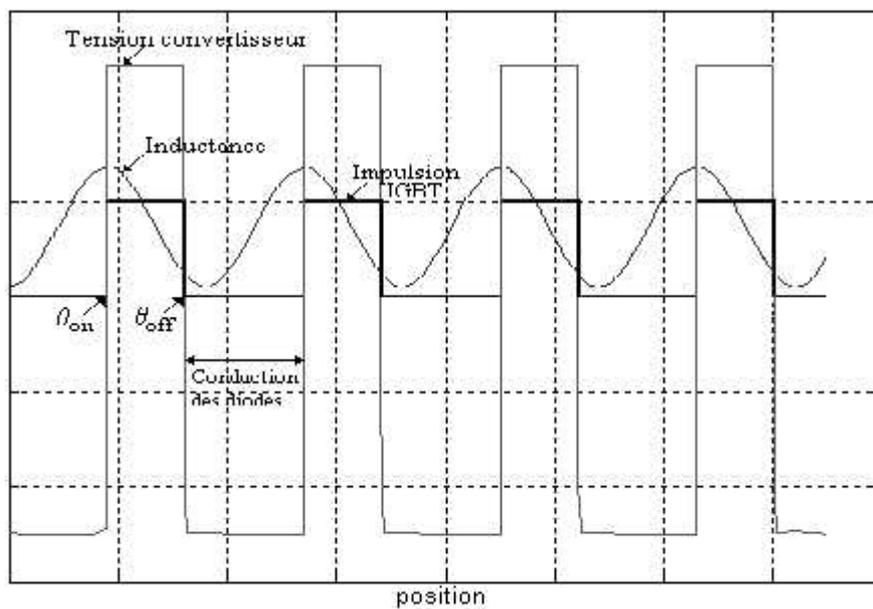


Fig.III.3 Conduction des IGBT pendant la décroissance de l'inductance

En premier lieu, une boucle à tension positive, se produit lorsque les deux interrupteurs associés à un enroulement de phase sont fermés. La tension d'alimentation est connectée à travers les bornes de l'enroulement de la phase et le courant de phase augmente rapidement, afin de fournir de l'énergie. Le second mode de fonctionnement est à une boucle à tension nulle. Ceci se produit lorsque l'un des deux interrupteurs est éteint pendant que le courant circule dans un

enroulement de phase. Dans ce cas, le courant continu à circuler à travers un interrupteur et une diode. L'énergie n'est prise ni retournée à la source DC.

La tension aux bornes de l'enroulement de phase durant cette période est égale à la somme des tensions à l'état passant des deux interrupteurs. Cette tension est très faible par rapport à la tension d'alimentation de sorte que le courant dans l'enroulement de phase décroît très lentement. Le dernier mode de fonctionnement est une boucle à tension négative. Les deux dispositifs de commutation sont à l'arrêt. Le courant est forcé à circuler à travers les deux diodes de roue libre. Le courant dans l'enroulement de phase décroît rapidement lorsque l'énergie est renvoyée par le générateur à la source.

III.3. CONVERTISSEUR A DEMI PONT ASYMETRIQUE

La Fig.III.4 montre le convertisseur à demi pont asymétrique considérant seulement une phase de la GRV. Le reste des phases sont similairement reliées. La mise en marche des transistors S_1 et S_2 fait circuler un courant dans la phase A de la GRV. Si le courant augmente au-dessus de la valeur commandée, les interrupteurs S_1 et S_2 seront arrêtés. L'énergie entreposée dans l'enroulement du moteur de la phase A maintiendra le courant dans la même direction jusqu'à ce qu'elle soit épuisée. Par conséquent, les diodes D_1 et D_2 deviendront conductrice jusqu'à la fin de cette phase. Cela augmentera le courant, et le ramène rapidement au-dessous de la valeur commandée. Cette opération est expliquée avec les formes d'onde correspondantes à la Fig.III.5. Supposant qu'un courant de la grandeur I_p est désiré pendant la pente positive de l'inductance, du courant de la phase A est produite avec un profil linéaire d'inductance. Ici, l'avancement de phase au début et pendant la commutation est négligée.

Le courant de référence, i_a^* , est imposé par une boucle fermée en courant où il est comparée au courant de phase. L'erreur du courant est présumée pour être traitée par un contrôleur d'hystérésis avec une valeur de i . Quand l'erreur du courant dépasse $-I$, les commutateurs S_1 et S_2 sont arrêtés simultanément. Le contrôleur d'hystérésis est considéré ici dû à sa simplicité dans le concept et l'exécution. À ce moment-là, les diodes, le D_1 et le D_2 succèdent le courant et accomplissent le chemin par la source D.C.

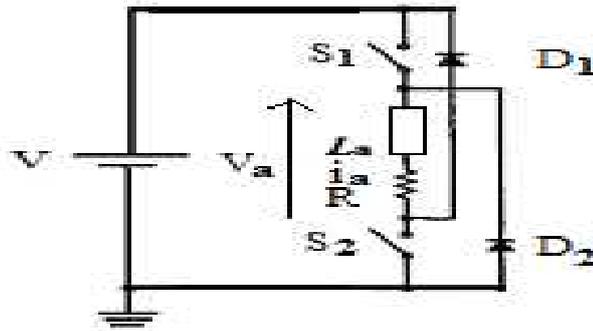
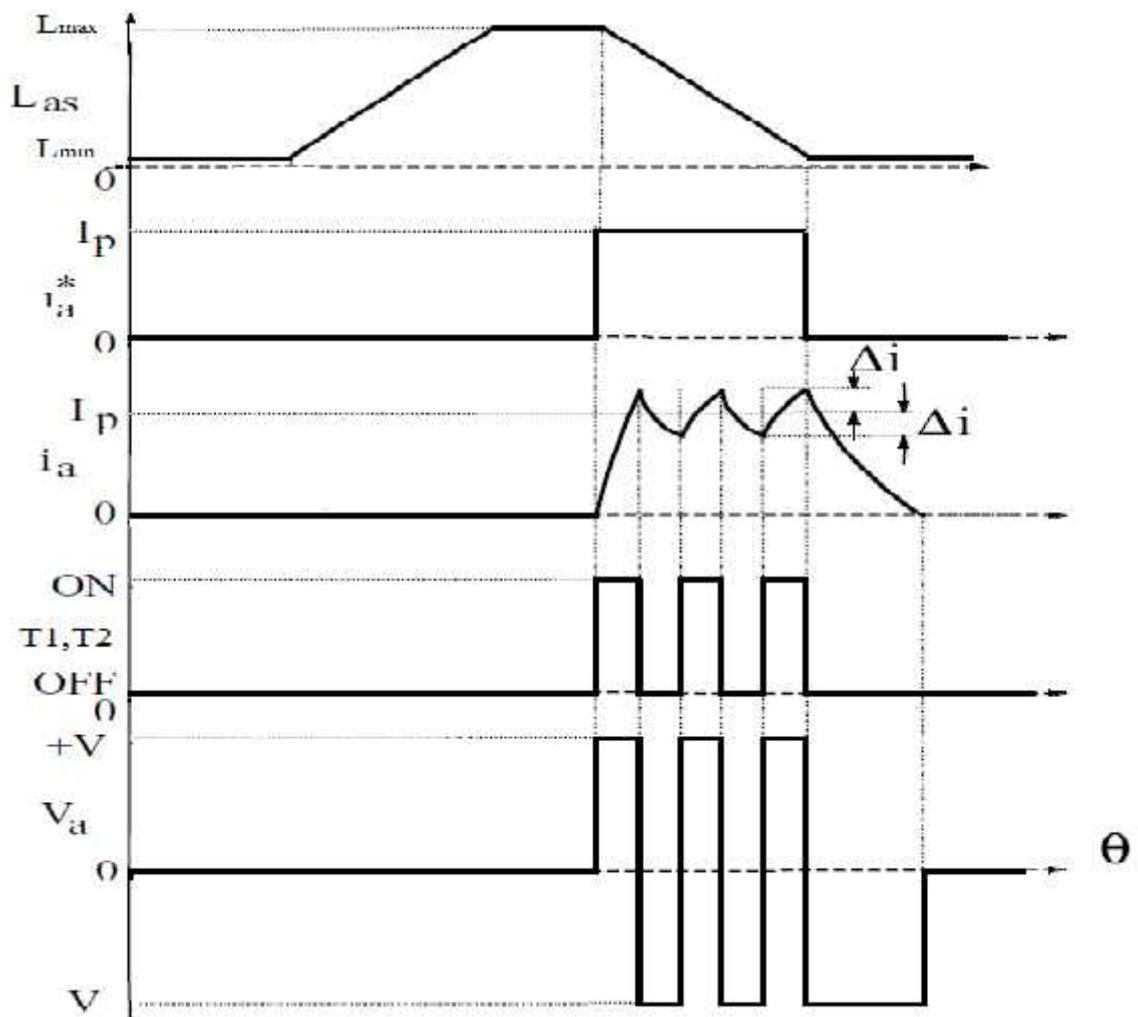


Fig.III.4 Une phase de convertisseur a demi-pont asymétrique

La Fig.III.5 montre les formes d'ondes du convertisseur asymétrique à demi-pont.



(b)

Fig.III.5. Formes d'ondes du convertisseur asymétrique

III.4. LE CONVERTISSEUR A SUPPRESSION DE RESISTANCE (SRC)

Le circuit du AHBC est un peu compliqué, car AHBC à besoin de deux transistors et deux diodes par phase.

Le générateur à reluctance variable a gagné une attention considérable dans les projets de recherches pour plusieurs raisons. Il a également diverses fonctionnalités souhaitables y compris une structure simple et solide, facilité d'entretien, petit moment d'inertie du rotor et un faible coût car le GRV n'a aucun enroulements au rotor ni un aimant permanent. La structure solide est utile pour un générateur à vitesse ultra haute comme un générateur à turbine microgas [1,69].

La structure simple à petit moment d'inertie s'adapte au générateur multipolaire destiné aux aérogénérateurs à vitesse réduite.

Cependant, la GRV n'a pas été suffisamment effective dans la pratique car une conception optimale de la GRV n'a pas été établie. En outre, l'excitation de la génératrice conventionnelle de la GRV utilise un convertisseur à demi-pont asymétrique (AHBC) dont le circuit est un peu compliqué [55]. Certains circuits d'excitation simple ont été proposés.

Dans ce chapitre, nous rapportons quelques considérations sur un générateur GRV 6/4 excité par un convertisseur à suppression de résistance (SRC) qui se compose d'une moitié des dispositifs de commutation par rapport au AHBC. Les caractéristiques de fonctionnement des GRV avec ce convertisseur (SRC) et avec le convertisseur à demi-pont asymétrique (AHBC) ont été examinées sous Matlab/Simulink.

La Fig.III.6 représente le modèle globale du système de la GRV excité par le SRC.

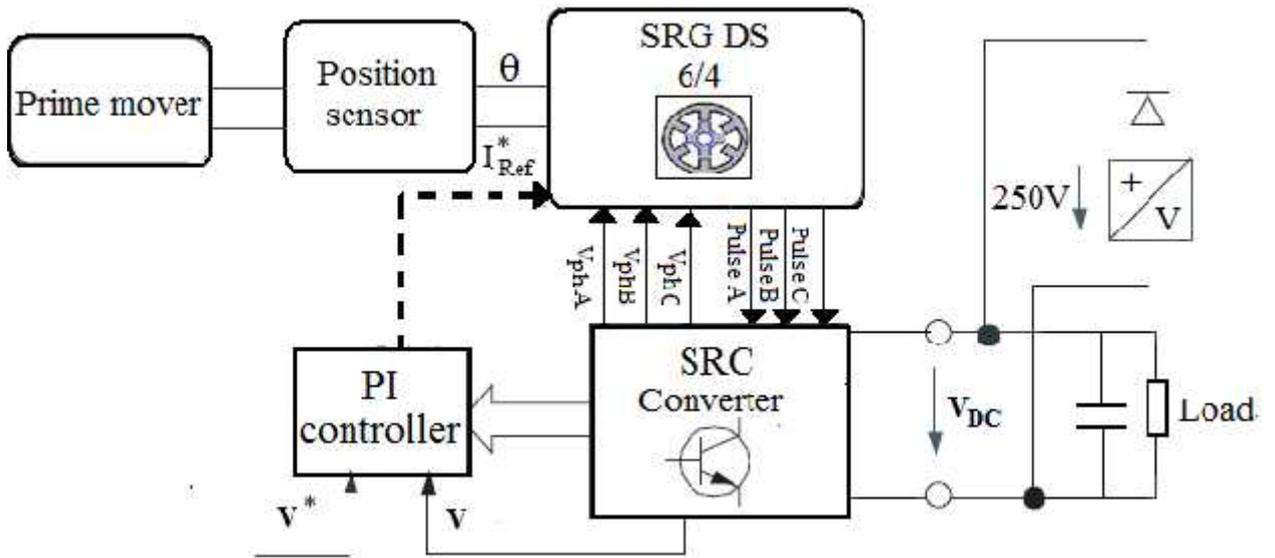


Fig.III.6 Modèle globale du système de la GRV excité par le SRC

Afin de réduire le nombre des interrupteurs, un convertisseur SRC a été proposé. La Fig.III.7 illustre une configuration de circuit de ce convertisseur.

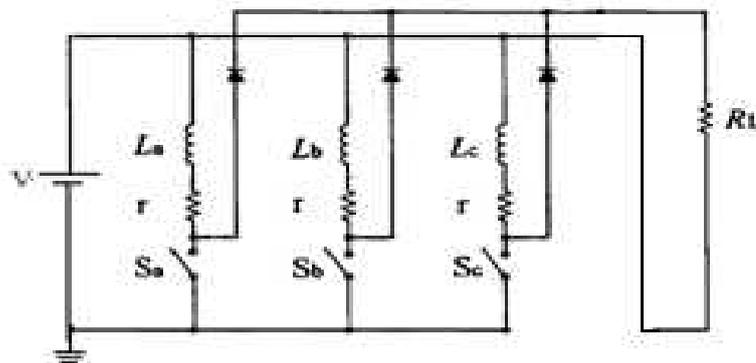


Fig.III.7. La configuration de circuit de ce convertisseur SRC

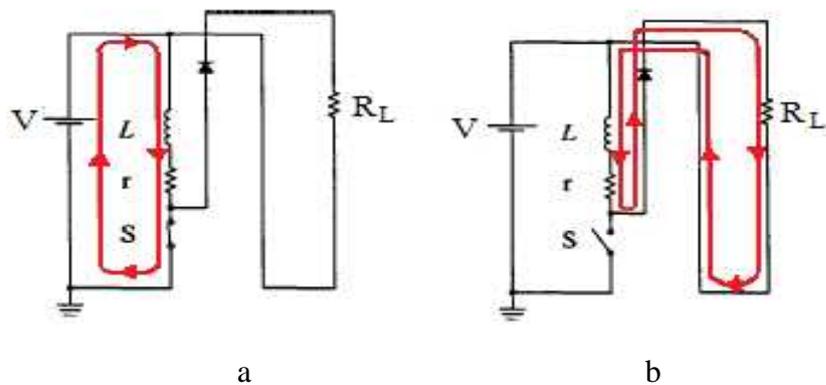


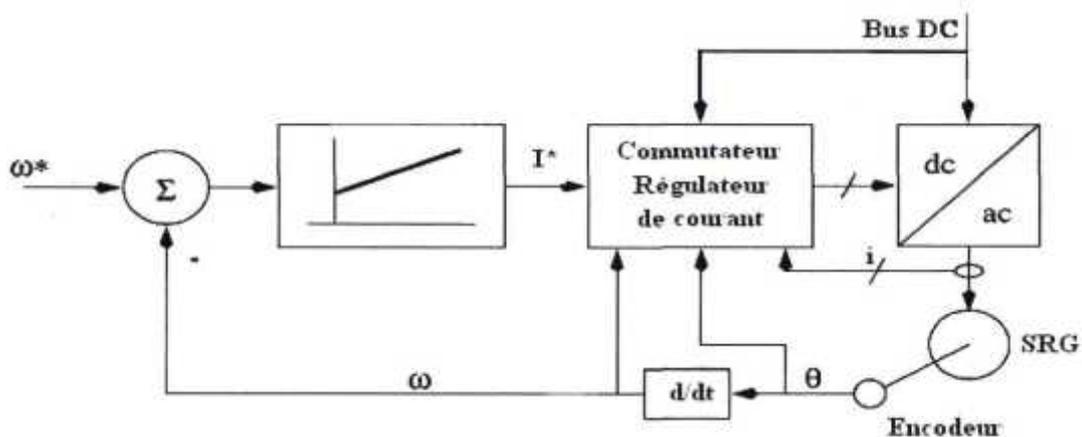
Fig.III.8 Modes de fonctionnement du convertisseur SRC (a) mode d'excitation. (b) mode de génération

La Fig.III.8 indique les modes de fonctionnement du convertisseur SRC par phase. Lorsque le transistor S est activé, la Tension V_{DC} s'applique aux enroulements et le courant circule dans le chemin montré à la Fig.III.8.a. Lorsque le transistor S est éteint, le courant traverse la diode de roue libre et la résistance de charge R_L comme indiqué à la Fig.III.8.b.

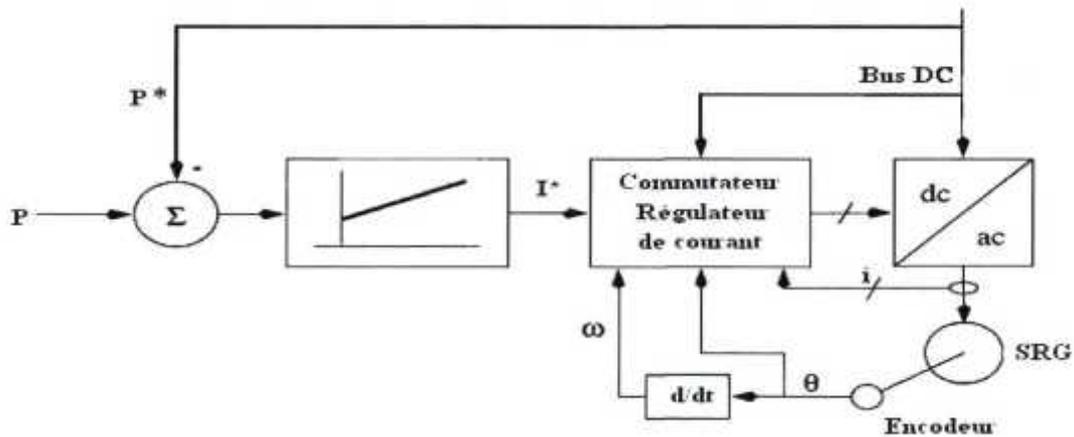
Le SRC se compose de la moitié des dispositifs de commutation pour l'AHBC. Les même IGBT et diodes de puissance ont été utilisées pour les deux convertisseurs.

III.5. COMMANDE DE LA GRV FACE AU PROBLEMES D'INSTABILITE ET NON LINEARITE

La GRV est instable en boucle ouverte. Cette instabilité se produit quand l'amplitude de la f.c.e.m est plus grande que celle de la source de tension. Par conséquent, l'augmentation de l'amplitude de la source de tension fait augmenter le courant de phase ainsi que l'énergie extraite du système d'entraînement. Cette augmentation d'énergie est convertie et dépasse la charge associée à la source d'excitation [70]. La commande de la GRV doit faire face aux défis suivants : l'instabilité de la GRV en boucle ouverte et la non-linéarité du système qui entraine des difficultés pour le calcul des gains des régulateurs. La boucle de régulation est soit une régulation de vitesse de la GRV, soit une régulation de la puissance fournie par la GRV. La Fig.III.9 montre les deux systèmes de régulation.



-a-



-b-

Fig.III.9 Structure de commande d'une GRV. (a) régulation de vitesse, (b) régulation de puissance fournie par la GRV

La Fig.III.9.a présente une régulation de vitesse de la GRV. La vitesse de rotation de la GRV est obtenue en dérivant la position du rotor obtenue par l'encodeur. L'erreur entre la vitesse de rotation et la vitesse de référence est corrigée par un régulateur PI qui donne à sa sortie la consigne de courant. Le commutateur et le régulateur de courant produisent et fournissent les angles d'amorçage et d'extinction appropriés des interrupteurs du convertisseur qui alimente la GRV. La Fig.III.9.b présente une régulation de puissance de la GRV. La puissance régulée est celle fournie par la GRV. L'erreur entre la puissance de référence et la puissance d'entrée de la GRV est corrigée par un régulateur PI La boucle interne est similaire que celle de la régulation de vitesse.

Une application pour une éolienne par exemple, nécessite une régulation en vitesse car on doit chercher toujours la vitesse optimale pour l'éolienne pour avoir sa puissance maximale.

Par contre, dans une application comme le système d'alimentation d'un avion, la GRV est régulée en puissance selon les besoins énergétiques de l'avion.

L'étude pour choisir les bons paramètres d'excitation pour un fonctionnement optimal est nécessaire. Ces paramètres doivent être choisis de telle façon à avoir la puissance maximale de la GRV avec le minimum des ondulations de couple et le minimum des pertes Joule pour chaque point de fonctionnement. Donc un fonctionnement avec des paramètres d'excitation

variables selon le point de fonctionnement de la GRV est indispensable pour avoir un fonctionnement optimal de la GRV.

Il est à noter que la tension de la phase A est alors négative et égalera la tension de source DC. Pendant cet intervalle, l'énergie stockée dans l'inductance de la machine est envoyée à la source, l'échange d'énergie entre la charge et la source se fait à plusieurs reprises dans un cycle du courant de phase. Après le démarrage initial, pendant l'ouverture et l'arrêt du S_1 et du S_2 , l'enroulement de phase de machine éprouve deux fois le taux de changement de tension de lien de la tension continue, qui en résulte une détérioration plus élevée de l'isolement.

III.6. LE CONTROL DE LA GRV

Compte tenu du profil d'inductance illustré à la Fig.III.10 pour le fonctionnement générateur, les enroulements de phase sont excités au début de la diminution de l'inductance de plus en plus. La production du couple pour le mode moteur et générateur sont également indiquée. Les couples indiqués dans la figure suivante sont pour une phase.

La machine produit des impulsions discrètes du couple et, par une conception appropriée de l'allure de l'inductance, il est possible de produire un couple continu. En pratique, ce couple se produit suivant la densité de puissance de la machine et le contrôle de la GRV.

De la Fig.III.10.a, on voit que le couple moyen est contrôlé en ajustant l'amplitude du courant I_p , ou en faisant varier l'angle de conduction, α . Pour réduire les ondulations du couple, il est conseillé de garder l'angle α constante et varier l'amplitude du courant.

Cette dernière approche nécessite un régulateur de courant dans le moteur d'entraînement et également garantit un fonctionnement sûr.

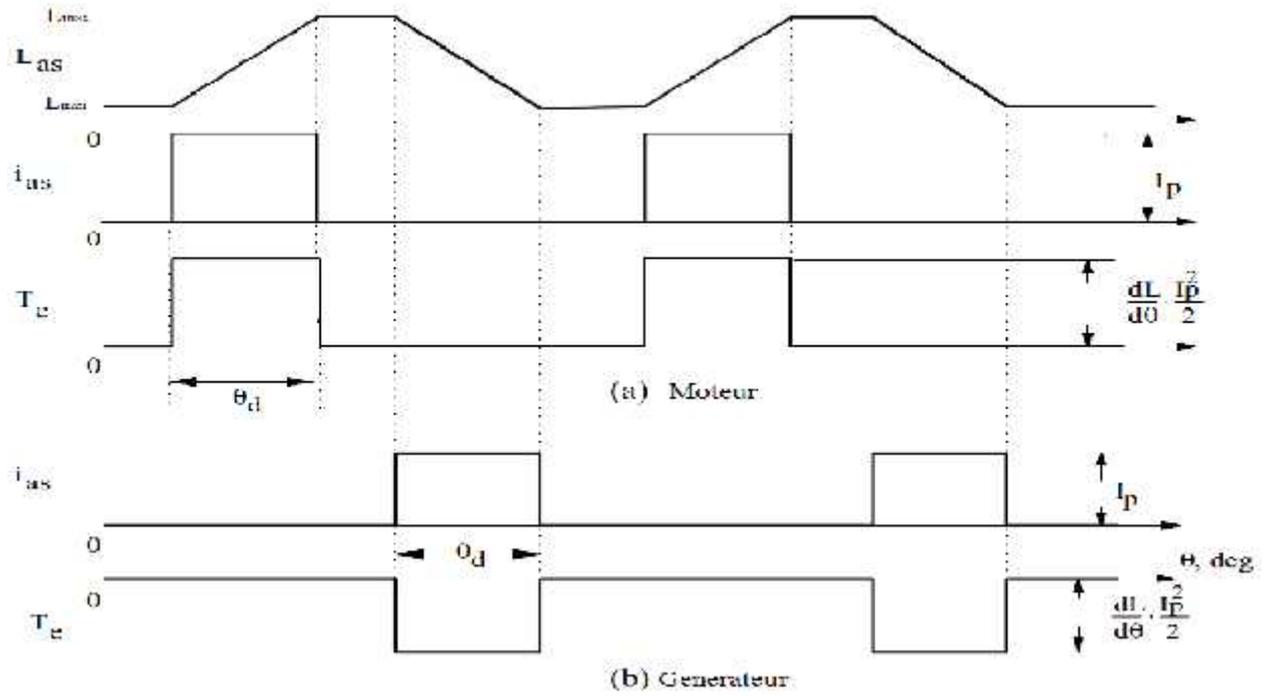


Fig.III.10 Les deux modes de fonctionnement de la MRV

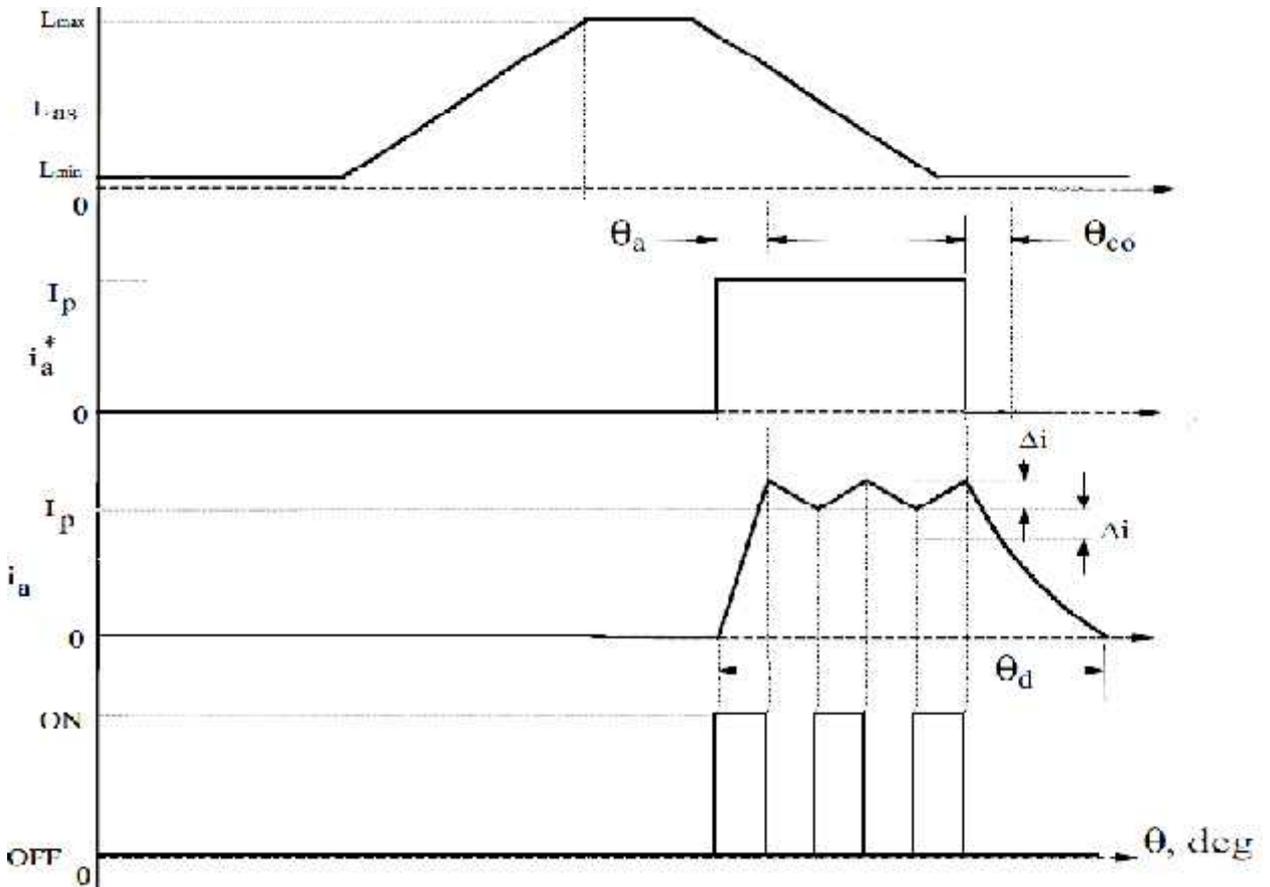


Fig.III.10.a Contrôle du Courant de la GRV

Pour assurer une production de couple instantanée, il est essentiel que le courant désiré existe à l'instant de la diminution de l'inductance. Cela nécessite une application avancée de tension pour faire démarrer le courant et une commutation avancée pour apporter le courant à zéro avant que la pente positive de l'inductance soit rencontrée.

Le courant est maintenu à I_p par la mise en marche ou l'arrêt des transistors de commutation. Le courant réel n'est autorisé qu'à s'écarter de la valeur $\pm i$, et ce taux est ajusté pour s'assurer un minimum de la fréquence de commutation et un minimum de pertes dans la mise en marche et à l'arrêt (on et off).

Les informations de la position du rotor sont essentielles pour le contrôle de la GRV comme pour les commandes des machines synchrones à aimant permanent et les machines DC et brushless. Comme les autres machines, les informations de position peuvent être estimées pour la MRV mais beaucoup plus facilement et à toutes les vitesses.

Il n'y a aucune charge séparée ou spéciale pour l'entraînement de la MRV en comparaison avec d'autres machines. Même si les caractéristiques du couple dépendent non seulement de la position du rotor, mais aussi du le courant d'excitation.

La simulation des différents contrôleurs est décrite dans ce chapitre.

III.6.1. TYPES DE CONTRÔLEURS UTILISÉS DANS LA GRV

III.6.1.1. modulation de largeur d'impulsion (PWM) [62]

Le régulateur de courant PWM comprend les blocs de contrôle suivants : générateur d'erreur du courant, un régulateur PI de courant, bloc d'échantillonnage et de stockage, et un contrôleur PWM, comme illustré à la Fig.III.11. Chaque boucle de contrôle du courant de phase a une structure de contrôleurs identiques.

Dans la modulation de largeur d'impulsion (PWM), l'énergie du système stockée au cours de la région d'excitation peut être réglée en mettant le signal PWM pour contrôler la fixation de l'angle de la mise en marche et arrêt.

Le contrôleur PWM prend la sortie du circuit et calcule le rapport cyclique et par conséquent les temps de fermetures et d'ouverture dans une période PWM pour la mise en œuvre.

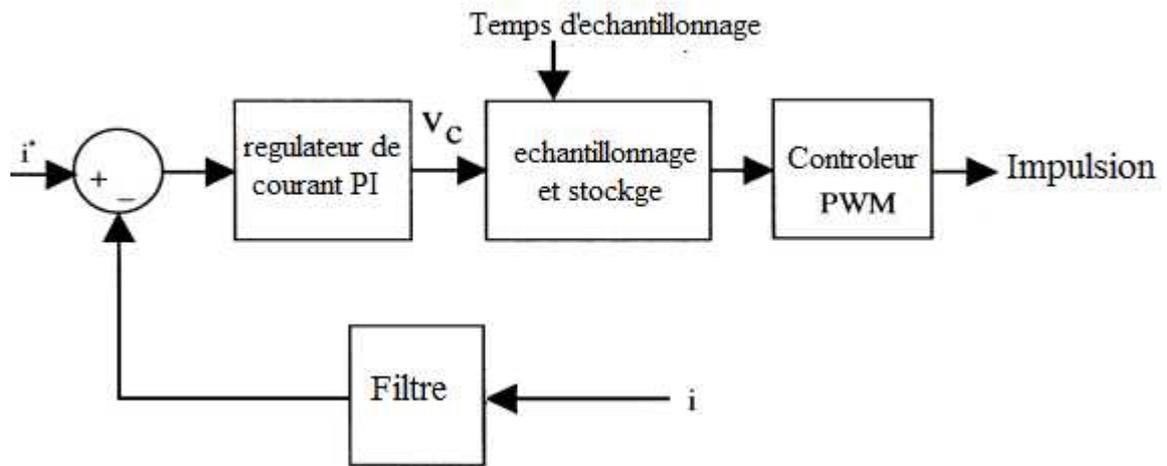


Fig.III.11 Le contrôleur PWM

III.6.1.2. contrôleur du courant hystérésis

Dans le contrôleur du courant basé sur l’hystérésis, le contrôle du courant est beaucoup plus simple. L’erreur entre le courant de référence et le courant de la phase doit être calculée, ensuite les impulsions de commande sont générées après le passage par le contrôleur d’hystérésis.

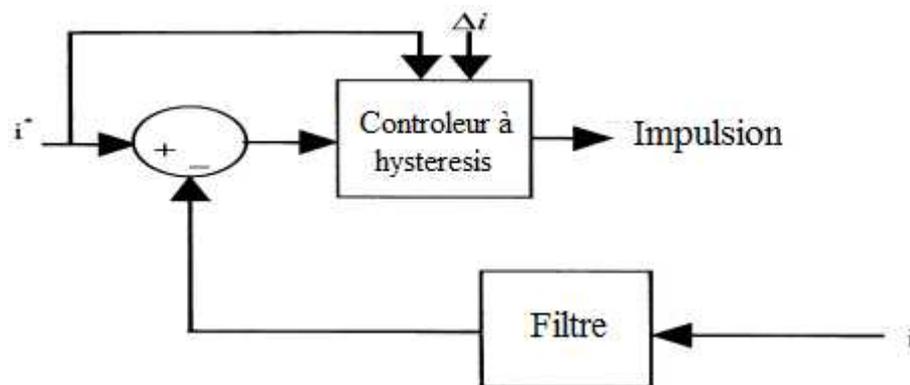


Fig.III.12 Le contrôleur hystérésis du courant

La modélisation est comme suit : le courant de commande i_a^* sera comparé au courant de phase du générateur, i_a .

La logique de commutation du contrôleur d’hystérésis est récapitulée comme suit :

$$Si (i_a^* - i_a) \geq \Delta i, \quad \text{donc} \quad V_a = V_{dc}$$

$$Si (i_a^* - i_a) \leq -\Delta i, \quad \text{et} \quad i_a^* > 0, \quad \text{donc} \quad V_a = 0$$

Si $(i_a^* - i_a) \leq -\Delta i$, et $i_a^* \leq 0$, donc $V_a = -V_{dc}$

Où Δi est la bande d'hystérésis et V_{dc} est la tension continue d'excitation. Il est supposé que les dispositifs de puissance dans le convertisseur sont idéaux dans cette illustration, par conséquent leurs chutes de tension et temps de commutation sont négligés. Il est à noter que quand l'erreur du courant est moins que le négatif de la bande d'hystérésis du courant, la tension appliquée à la phase de machine est zéro quand la commande du courant est positive, et la tension appliquée à la phase de machine est négative quand la commande du courant est négative.

III.6.1.3. contrôleur de la position d'angle (APC) [62]

Le processus d'excitation peut être contrôlé en régulant les angles de sa mise en marche et arrêt. Généralement, dans ce contrôleur, θ_{off} est optimisé et fixé avec la vitesse du rotor, en variant l'angle θ_{on} , le courant sortant de la GRV augmente ou diminue en fonction de l'écart entre ces deux angles. Lorsque la vitesse augmente, le courant de phase est réduit et la capacité de production de la GRV se dégrade.

III.6.1.4. régulateur hacheur de courant (CCC) [62]

En CCC, les deux interrupteurs sont ouverts lorsque les courants de phase atteignent un seuil pendant la croissance de l'inductance. Le courant de phase ne dépassera pas le courant de commande I_c par le hachage. Le courant de phase est incontrôlable dans la région de génération.

Lorsque le système fonctionne dans la région de génération, la force contre électromotrice peut augmenter le courant de phase au-dessus de I_c , bien que les deux interrupteurs soient ouverts. Le courant est limité par le contrôle de découpage durant la diminution de l'inductance, mais, le courant peut avoir une augmentation, ce qui entraîne que la zone du courant au cours de cette région est plus importante que celle durant la région de l'augmentation de l'inductance.

III.6.1.5. le contrôleur de haute performance utilise dans la GRV

Le système de contrôleur vise à créer une haute performance des commandes de contrôle pour maintenir la tension de sortie du système. Le contrôleur de performances affecte sérieusement les caractéristiques statiques et dynamiques du système.

En conséquence, il y a plusieurs stratégies de commande typique. Le control de l'angle de position (APC), contrôleur de hacheur du courant(CCC) et Modulation de largeur de l'impulsion (PWM).

Du fait que la performance du système est très sensible à l'angle θ_{off} , la mise en œuvre de l'APC a certaines difficultés. Dans ce chapitre, une stratégie de contrôle à haute performance nommée PI + CCC (PCC) est proposée. Le contrôleur à deux boucles fermées : une boucle fermée de tension appelée boucle extérieure (VC) et une boucle fermée du courant appelée boucle intérieure (CC).

VC est basé sur le contrôleur PI. Tout d'abord, il obtient la valeur entre la tension de sortie du système et le signal de tension donnée (270V) et puis crée la référence de courant I_{ref} via du régulateur PI.

CC est basé sur le contrôle de hachage du courant ; Il est implémenté par Simulink. Les angles θ_{on} et θ_{off} dans ce contrôleur sont optimisées et fixées.

III.7. RESULTATS DE SIMULATION

Les formes d'onde du courant de phase par rapport au rapport cyclique avec le contrôleur PWM sont indiquées dans la Fig.III.13.

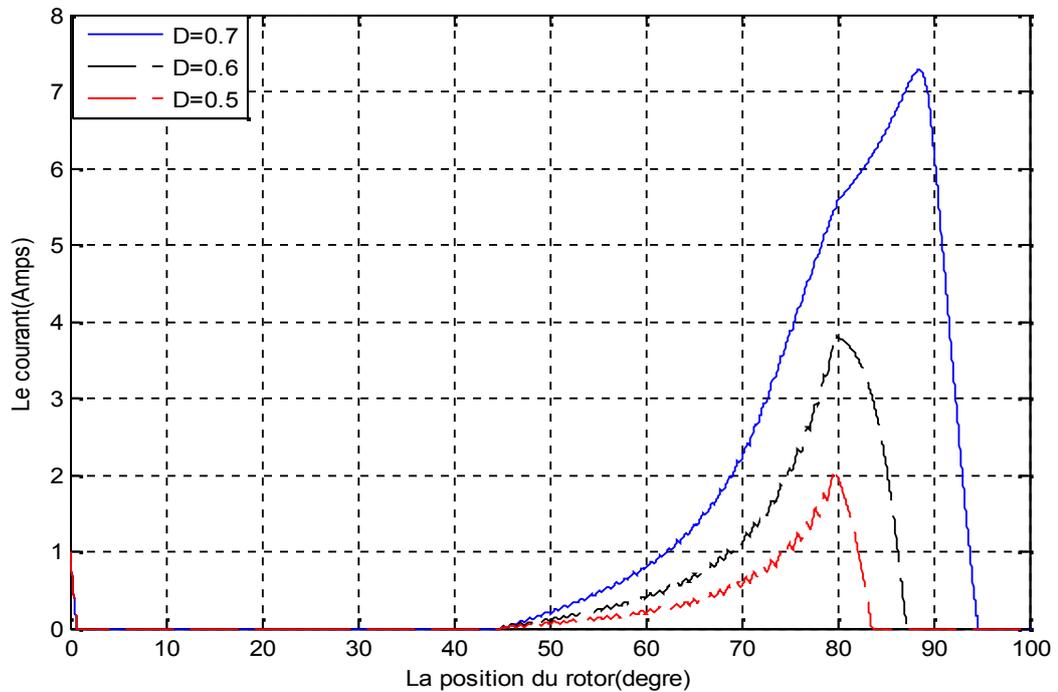


Fig.III.13 Formes d'onde du courant de la phase (a) avec le contrôleur PWM ($\theta_{on} = 45^\circ$ $\theta_{off} = 80^\circ$)

La Fig.III.14 représente le courant I_a pour $\theta_{on} = 45^\circ$ et différents θ_{off} .

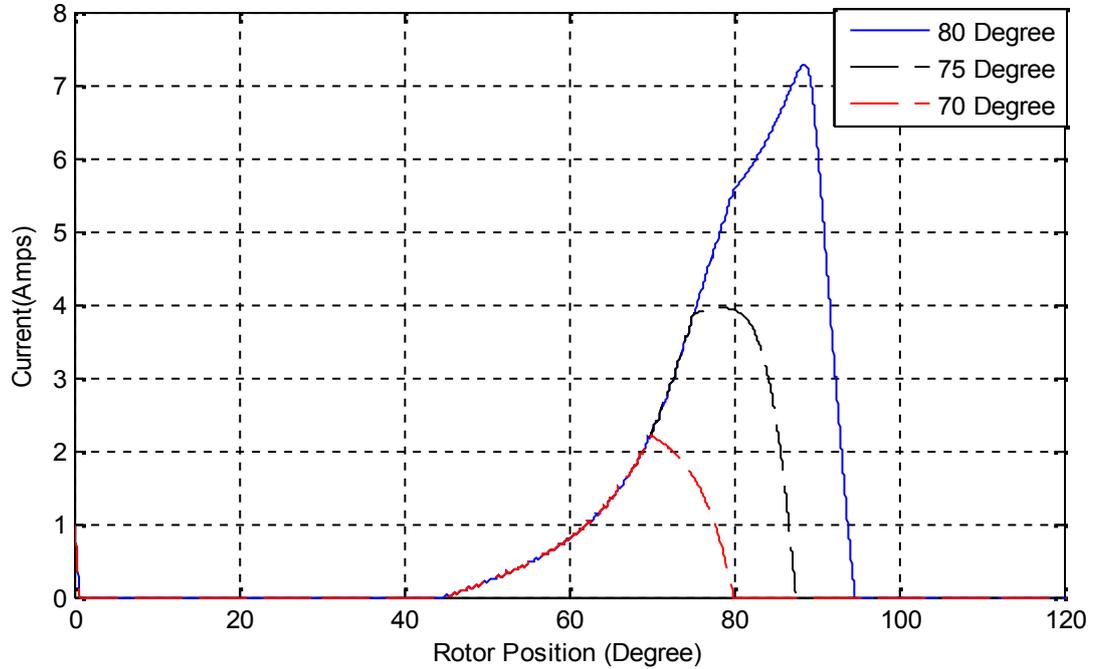


Fig.III.14 Le courant I_a d'une GRVDS 6/4 pour $\theta_{on} = 45^\circ$ et différents θ_{off}

La Fig.III.15 représente le courant I_a pour $\theta_{off} = 80^\circ$ et différents θ_{on} .

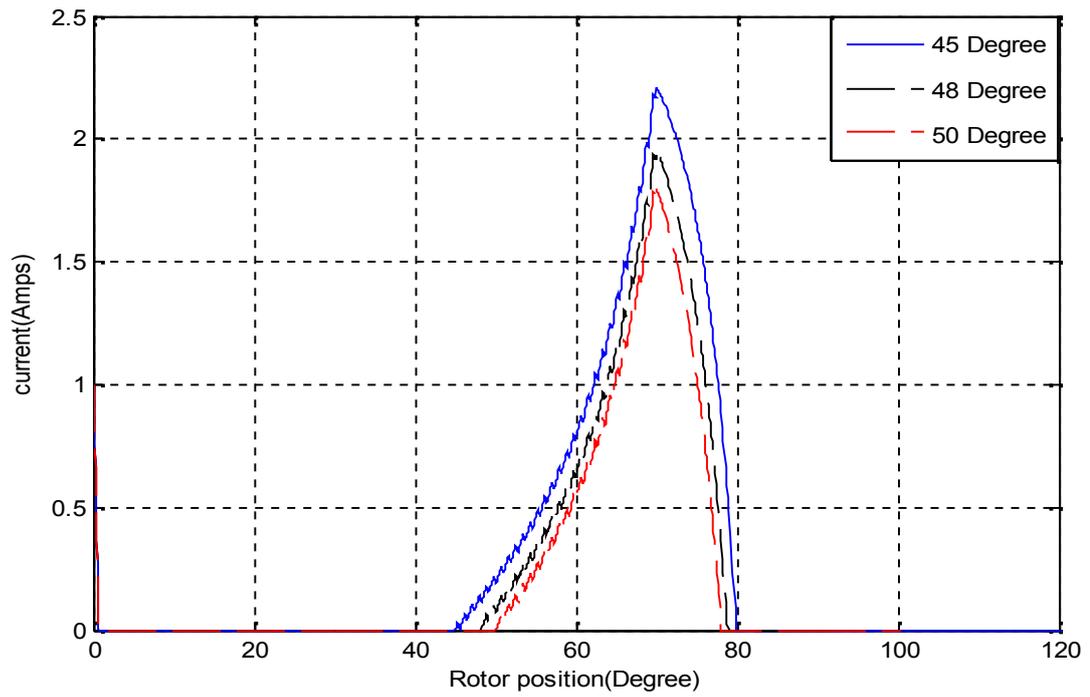


Fig.III.15 Le courant I_a d'une GRVDS 6/4 pour $\theta_{off} = 80^\circ$ et différents θ_{on}

De ces deux figures, il semble que le courant excitant est extrêmement sensible à θ_{off} .

Les formes d'onde du courant par rapport à la commande à découper sont affichées dans la Fig.III.16.

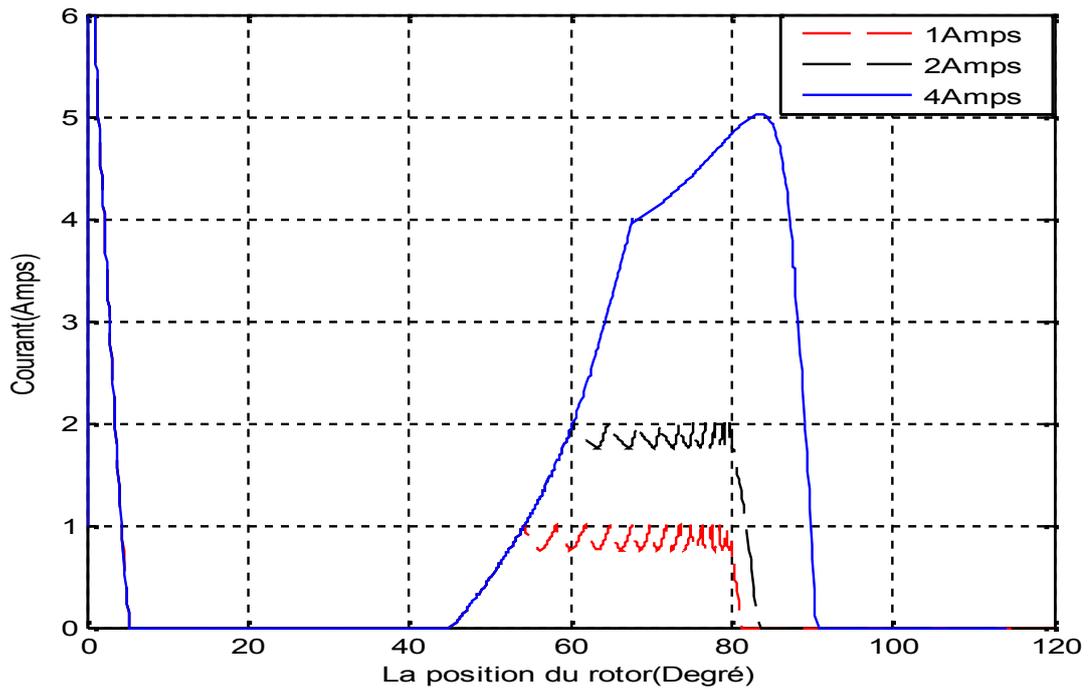


Fig.III.16 L'allure du courant avec le contrôleur CCC ($\theta_{on} = 45^\circ$ $\theta_{off} = 80^\circ$)

La Fig.III.17 représente la tension du convertisseur de puissance de la phase A.

C'est une tension alternative variant entre $-V_{DC}$ ($-250V$) et $+V_{DC}$ ($+250V$). Le niveau de $+250V$ est obtenu au cours de la conduction de l'IGBT S_1 et S_2 (phase de magnétisation), tandis que le niveau de $-250V$ est obtenu au cours de la conduction des diodes D_1 et D_2 (phase de génération).

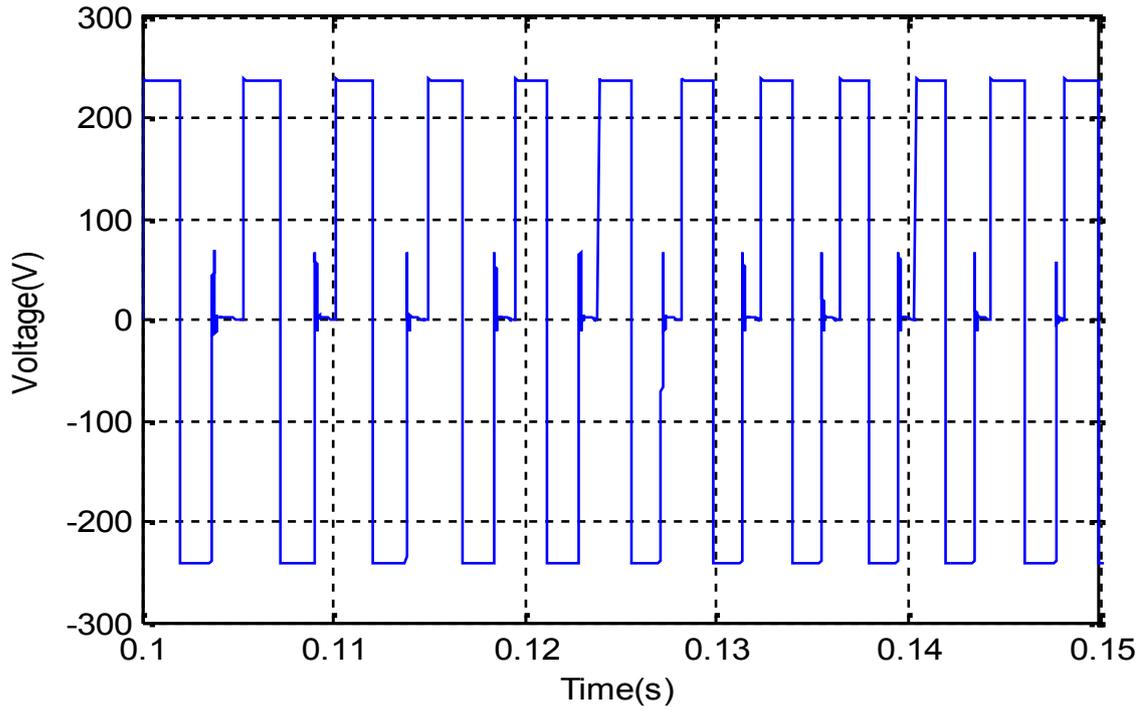


Fig.III.17 La tention de la phase (a) du convertisseur

La Fig.III.18 représente les allures des inductances pour les trois phases.

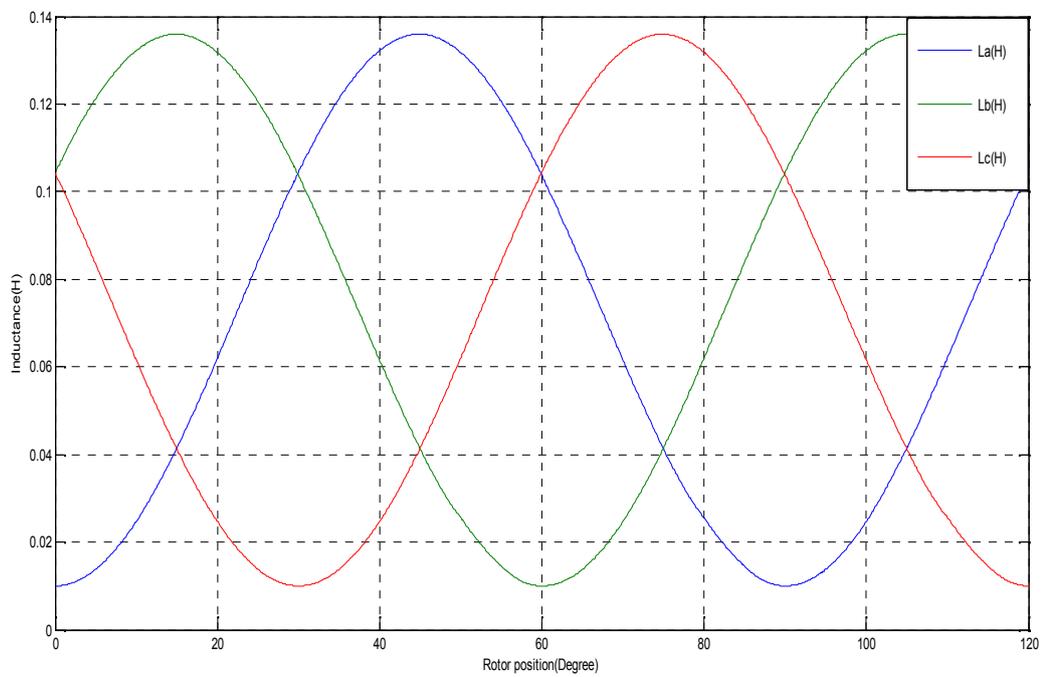


Fig.III.18 Les inductances des trois phases (H)

La Fig.III.19 montre que l'excitation est dans la région de décroissance de l'inductance.

Conformément aux tracés théoriques de la Fig.III.3, on obtient les mêmes tracés dans la Fig.III.19 où on voit clairement que la machine est excitée (magnétisée) lors de la phase de décroissance de l'inductance.

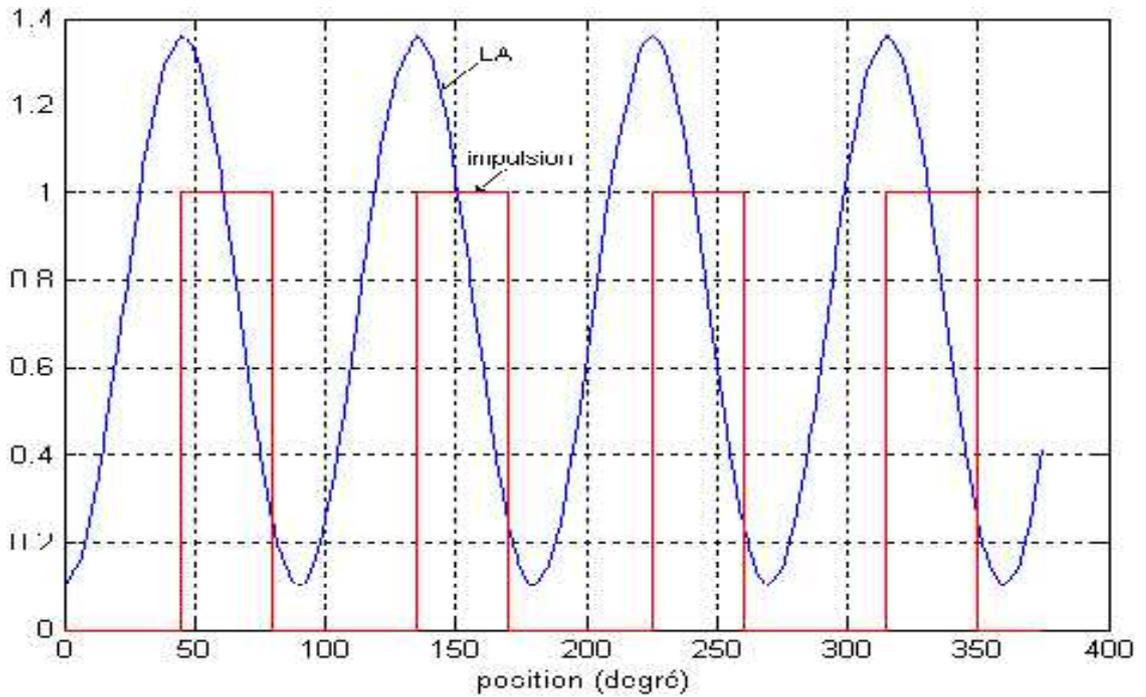


Fig.III.19 La position des impulsions par rapport à l'inductance

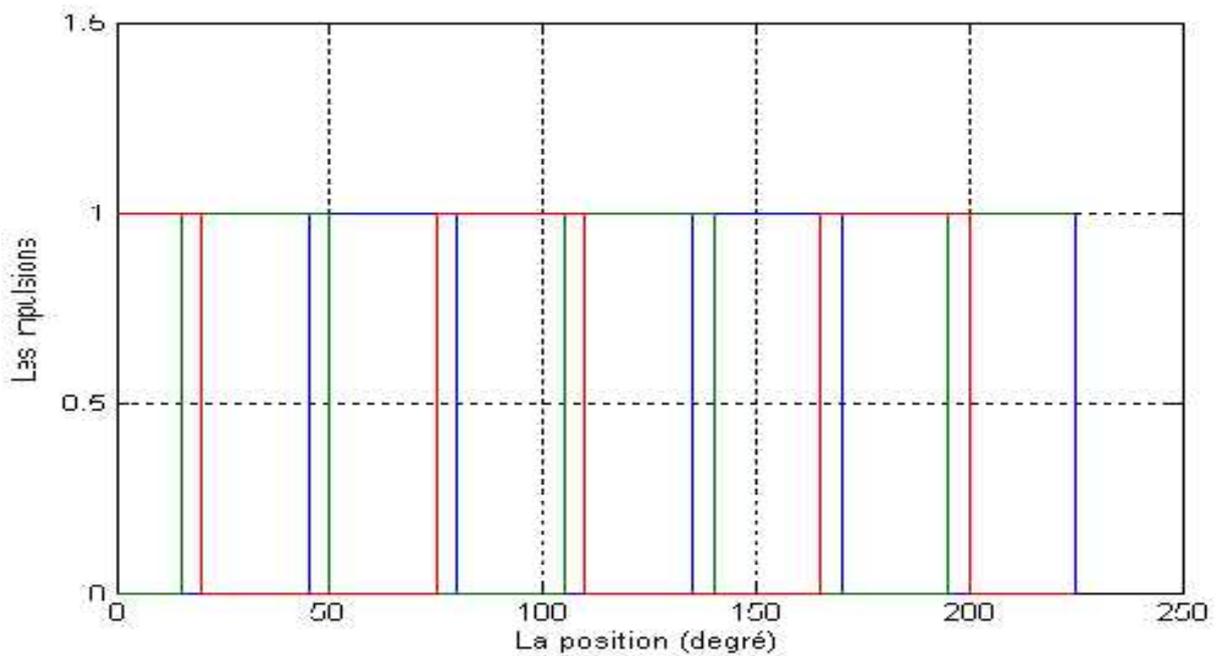


Fig.III.20 Les impulsions triphasées

Dans la Fig.III.20 précédente, on montre les impulsions des IGBT des trois phases du convertisseur. Là aussi, on remarque un décalage de $\pi/6$ entre les impulsions des phases A et B, et $2\pi/3$ 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.

Dans la Fig.III.21, les courants des trois phases sont simultanément tracés. Un décalage de $\pi/6$ est enregistré entre I_a et I_b , et un décalage de $2\pi/3$ est relevé entre I_a et I_c . 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.

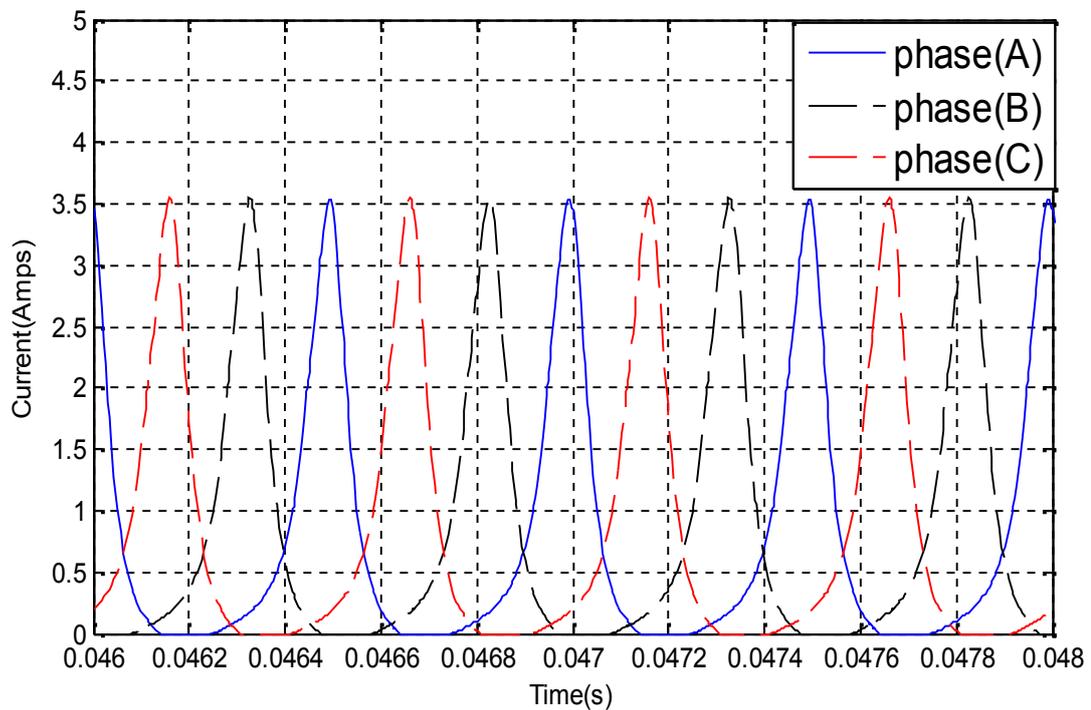


Fig.III.21 Les courants des trois phases (A)

Dans la Fig.III.22 les flux des trois phases en fonction de la position sont simultanément tracés. Le flux croît jusqu'à un maximum de 0.048Wb, puis décroît et devient nul, et après un certain temps il reprend la croissance (comme pour le cas du courant).

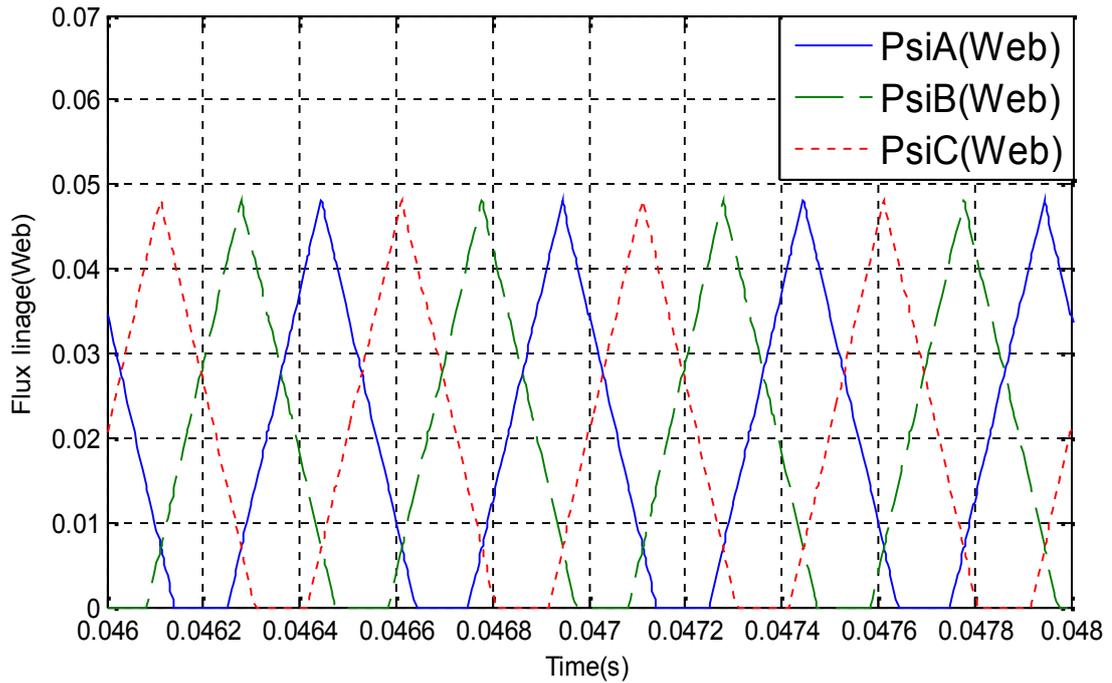


Fig.III.22 Les flux des trois phases (Web)

La Fig.III.23 montre L'allure du courant de la phase A d'une GRV 6/4 pour différentes vitesses d'excitation.

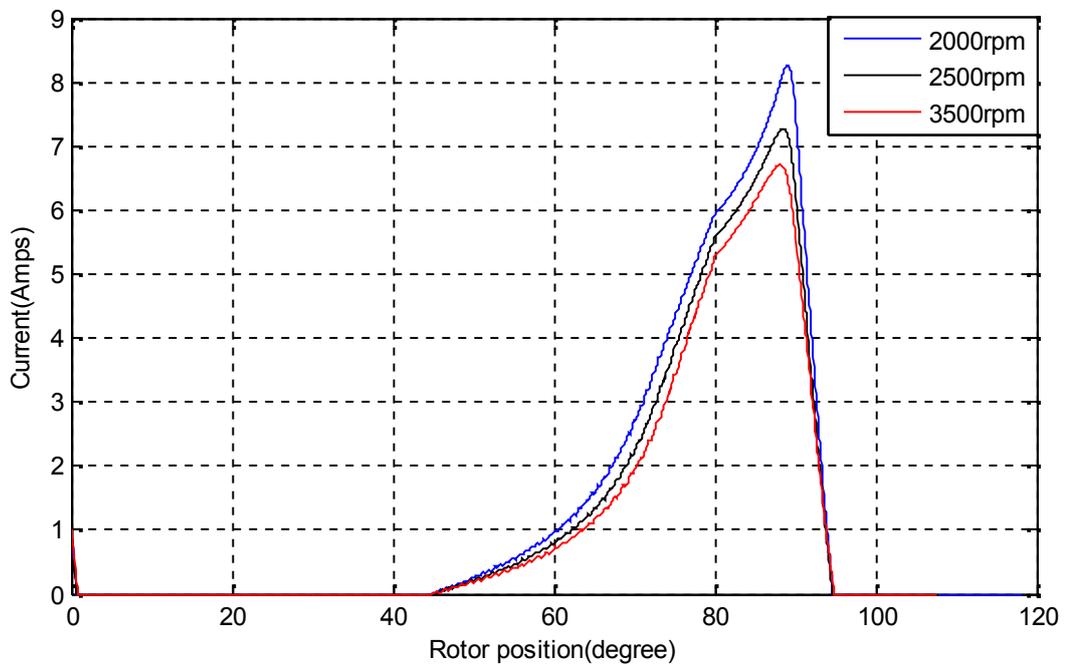


Fig.III.23 L'allure du courant de la phase A d'une GRV 6/4 pour différentes vitesses d'excitation

La Fig.III.24 illustre la variation du flux par rapport au courant qui délimite la surface du cycle de l'énergie magnétique pouvant être transformée.

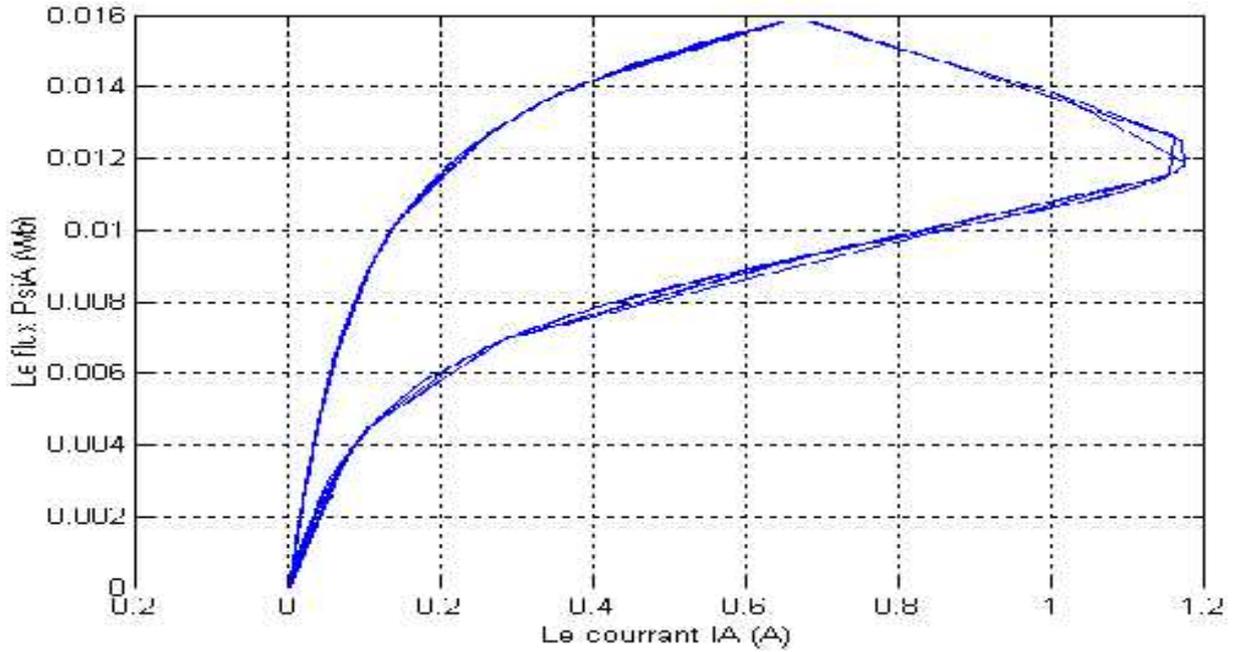


Fig.III.24 Le flux en fonction du courant (phase A)

La Fig.III.25 représente l'allure du couple électromagnétique après l'optimisation du système.

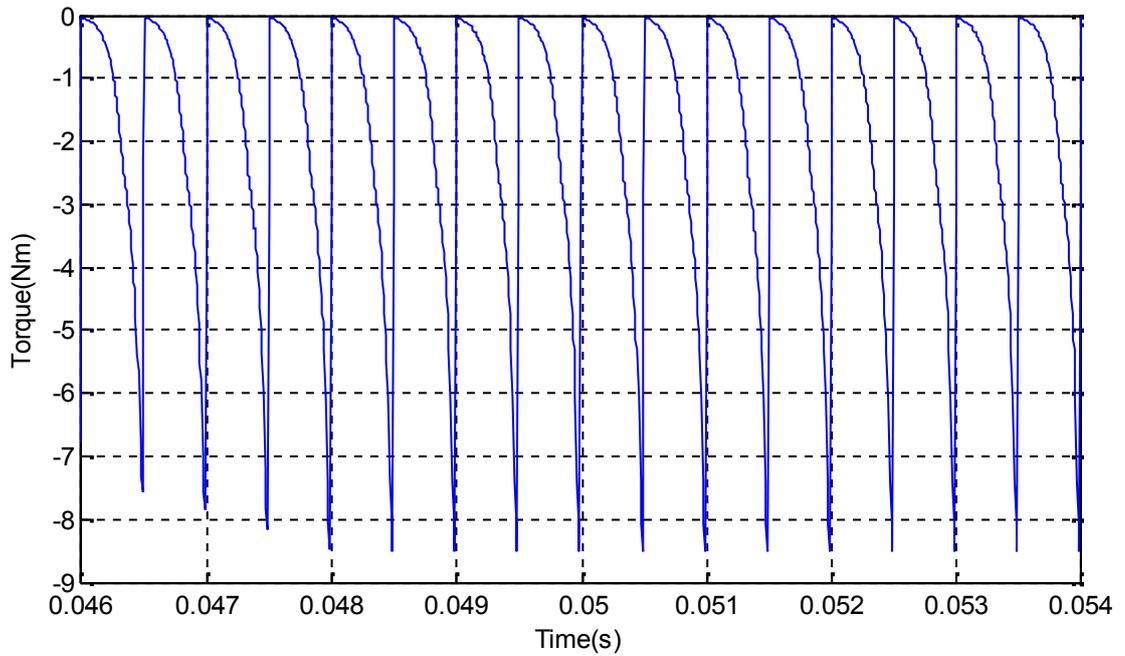


Fig.III.25 Le couple électromagnétique de la GRV

III.8. CARACTERISTIQUES COUPLES-COURANTS-POSITIONS

Pour réaliser une commande du couple on a besoin de connaître le couple instantané total développé par la machine. La méthode la plus rapide et la plus précise consiste à utiliser une table où sont stockées toutes les caractéristiques couples-courants-positions du machine. De telles caractéristiques peuvent être déterminées à partir des caractéristiques magnétiques du moteur ou du générateur. Aussi, Elles peuvent être mesurées directement sur la machine. Pour ce faire, on bloque le rotor à une position désirée, on excite une phase avec un courant continu et on procède à l'acquisition du couple à l'aide d'une jauge de contrainte. Une telle mesure est répétée pour différents courants et positions de la machine. La Fig.III.26 montre les caractéristiques de la phase A mesurées sur une période électrique (360°). Celles des phases B et C sont obtenues en effectuant des décalages de 2° et 3° respectivement. Ces données sont stockées dans une table pour déduire éventuellement, à partir du courant et de la position, le couple en temps réel.

La figure suivante présente l'allure du couple électromagnétique dans les deux modes de fonctionnement à l'aide de l'option **look-up-table** sur le logiciel Matlab.

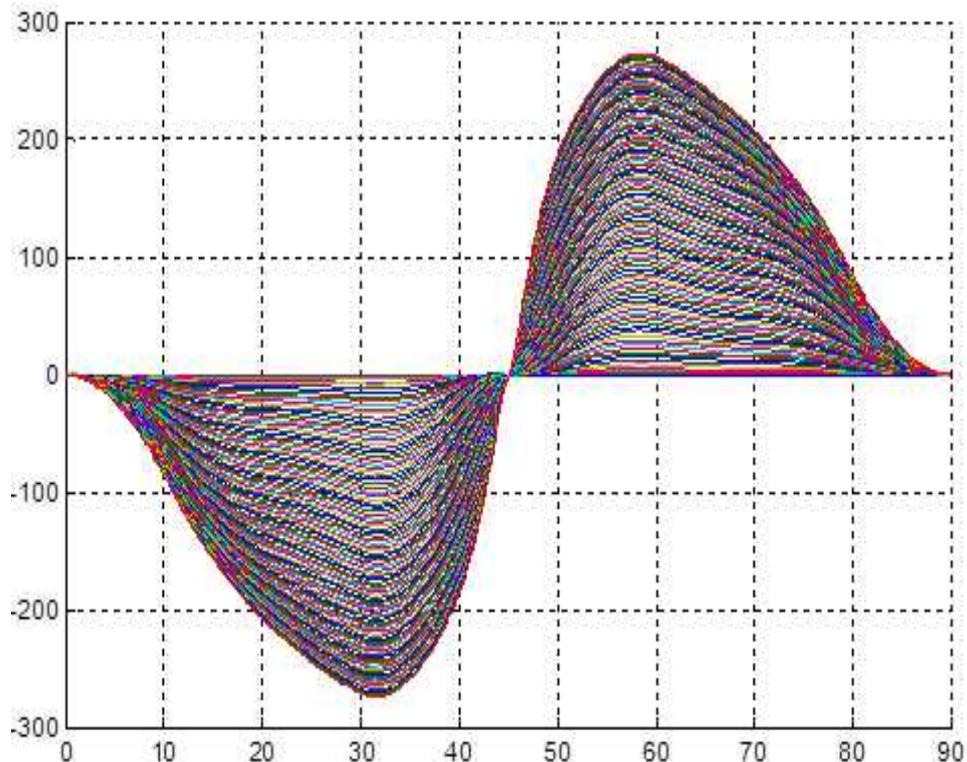


Fig.III.26 l'allure du couple électromagnétique par look-up-table

III.9. CONCLUSIONS

Il y a beaucoup de caractéristiques non linéaires dans le système GRV. Lorsque les conditions de fonctionnement et les charges sont modifiées, les caractéristiques de certains composants de système GRV seront modifiées. Il est donc difficile et complexe de construire le modèle par une utilisation simple d'un modèle mathématique de l'inductance non linéaire, ce travail construit un modèle complet de simulation non linéaire du système GRV basé sur Matlab/Simulink.

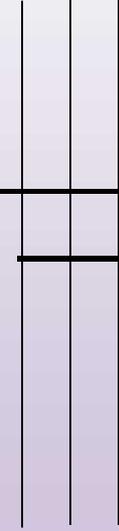
Les caractéristiques de fonctionnement du GRV avec les convertisseurs SRC et AHBC ont été discutées et simulées sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus avec le SRC sont presque identiques à ceux avec AHBC. Le circuit du SRC a la moitié des appareils électriques que le convertisseur AHBC. Cela signifie que la configuration du circuit du SRC est plus simple, fiable et économique.

D'après ce qui précède, il est évident que le système GRV a mieux des performances dynamiques et statiques avec le contrôleur PCC.

Le système complet de la GRV proposé minimise les ondulations, et la tension de sortie est stabilisée. Les résultats de simulation viennent présenter l'état des travaux du système générateur et valider l'applicabilité du modèle et du contrôleur proposée.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que le modèle Simulink de contrôle fournit un contrôleur efficace qui est facile à implémenter.

CHAPITRE IV



APPLICATIONS DES GRV AU
DOMAINE EOLIEN

IV.1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne a connu une croissance très importante durant la dernière décennie grâce aux avantages dont elle dispose pour l'environnement, additivement aux développements technologiques et les programmes gouvernementaux d'encouragement dans le monde. L'estimation des ressources de la puissance éolienne présente une difficulté majeure. Contrairement aux réserves de combustibles fossiles, la quantité d'énergie disponible varie selon la saison, l'heure de la journée. Différemment de l'énergie solaire, l'énergie éolienne est influencée par la topographie.

En outre, la quantité totale de l'éolien convertible sur un territoire dépend de :

- ✓ un large mesure des caractéristiques,
- ✓ le résultat espéré,
- ✓ le dimensionnement et la distribution horizontale du générateur éolienne.

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.

Dans un premier temps, le contexte énergétique mondial a été introduit, ensuite les différentes parties constituant une éolienne sont décrites d'une façon générale [71].

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

IV.2. CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL

IV.2.1. RESSOURCES ENERGETIQUES

IV.2.1.1. ressources non renouvelables ou épuisables

Une ressource est dite non renouvelable lorsque sa consommation aboutit à sa diminution notable à l'échelle des temps humains.

Les principales sources d'énergies non renouvelables sont dérivées des hydrocarbures, tels que le pétrole, le gaz naturel, et les huiles.

On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles :

1. Énergie fossile : notamment le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, et la consommation intensive, d'où les risques d'épuisement actuels.

2. Énergie nucléaire, les gisements d'uranium étant limités, et son stock ne se reconstitue pas à l'échelle de la vie du système solaire. Seule la fusion nucléaire pourrait, à condition d'être industriellement maîtrisée, produire de l'énergie sur le très long terme [72].

Ces ressources sont donc définies comme non renouvelables car leur épuisement au rythme de leur consommation actuelle est inévitable.

IV.2.1.2. ressources renouvelables ou non épuisables

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire [73].

IV.2.2. BESOINS ENERGETIQUES

IV.2.2.1. besoins en énergie primaire

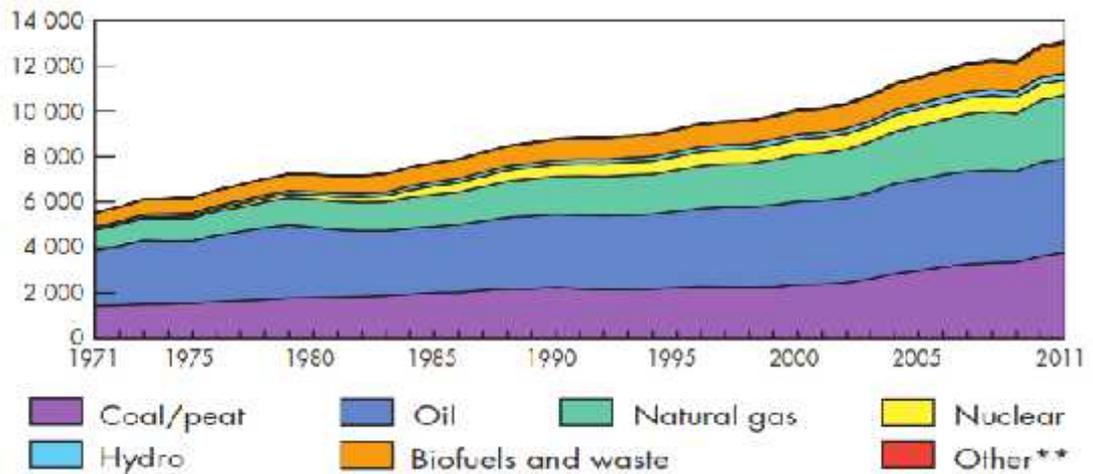
Une énergie primaire est l'énergie disponible dans la nature sans aucune transformation, et elle sera finale lorsque c'est sous cette forme qu'elle est commercialisée (l'électricité, le gaz naturel ou l'essence distribuée à la pompe sont des formes d'énergie finale).

La Fig.IV.1.a, représente l'évolution de la production mondiale d'énergie primaire par source entre 1973 et 2011. Il est possible de remarquer la part largement majoritaire des sources fossiles dans la production mondiale d'énergie primaire.

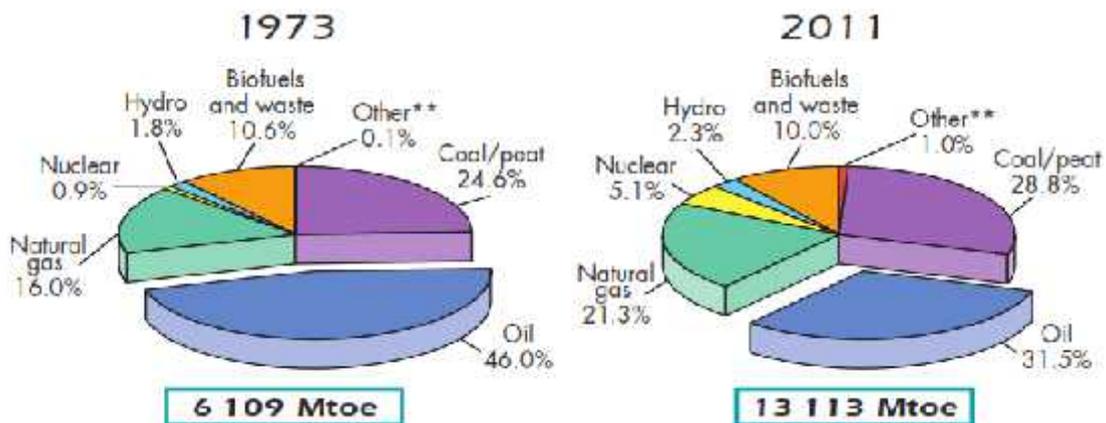
D’après l’Agence Internationale de l’Énergie [74] la production mondiale d’énergie primaire a doublé dans l’espace d’une trentaine d’années, passant de 6109 Mtep en 1973 à 13113 Mtep fin 2011 (Fig.IV.1.b), ce qui correspond à une progression moyenne annuelle de 1,4%.

D’après [75] la demande d’électricité augmente deux fois plus vite que la consommation globale d’énergie, et il est susceptible quelle augmente de plus des deux tiers entre 2011-2035.

En 2012, 42% de l’énergie primaire utilisée a été convertie en électricité [75].



a-Evolution de la production mondiale d’énergie primaire



b-Production mondiale de l’énergie primaire entre 1973 et 2011

Fig.IV.1. Evolution mondiale de l’énergie primaire [74]

IV.2.2.2. besoins en électricité

En 2012, la production d'électricité mondiale (Fig.IV.2 et IV.3) provenant des sources d'énergies renouvelables atteint 20,8 % de la production totale. Cette part est nettement inférieure à la production issue des combustibles fossiles (68,1 %) mais supérieure à la part de la production d'origine nucléaire (10,9 %). Les 0,2 % manquants sont fournis par la combustion des déchets dits non renouvelables. Les 6 sources composant la production d'électricité renouvelable, la principale est l'hydroélectricité avec 78,0 % de la production totale d'origine renouvelable. La biomasse, qui comprend la biomasse solide et liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables est la seconde source avec 6,9 %.

Viennent ensuite la filière éolienne (11,4 %), la géothermie (1,5 %), le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermiques (0,5 %), et enfin les énergies marines (0,01 %) [12]

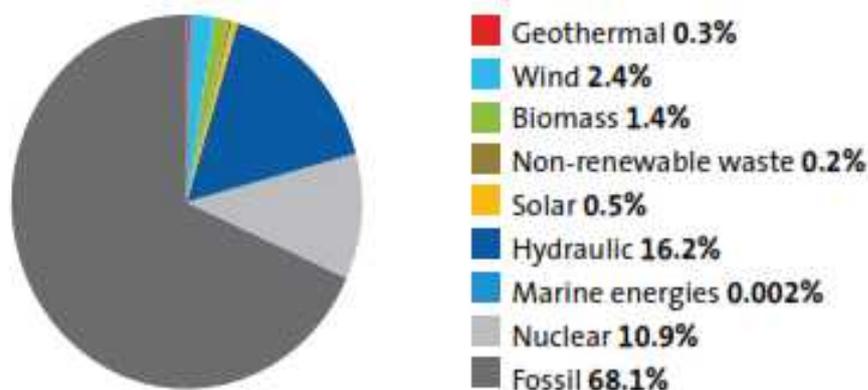


Fig.IV.2. Répartition de la production d'électricité mondiale en 2012 [76]

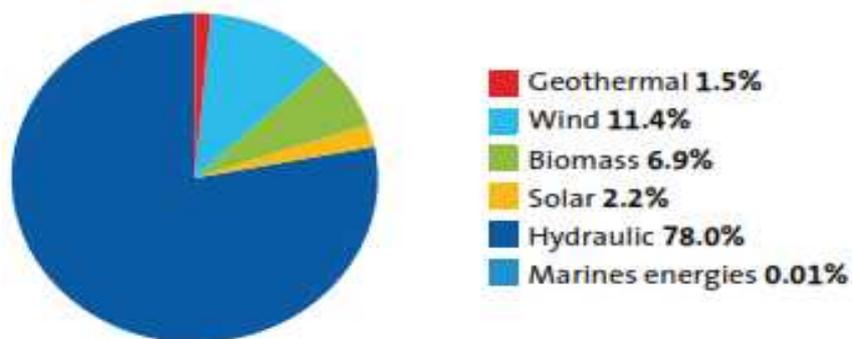


Fig.IV.3. Répartition de la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, en 2012 [76]

Entre 2002 et 2012 (Fig.IV.4), ce sont les sources de production solaire et éolienne qui ont connu des taux de croissance annuels moyens les plus importants. Ils ont en effet augmenté respectivement de 50,6 et de 26,1 % par an. Les énergies marines et nucléaires ont connu une baisse durant cette période de 0,5% et 0,8%. Pour les autres sources, ces valeurs sont comprises entre 3,1% (pour le nucléaire) et 3,9 % (pour le fossile).

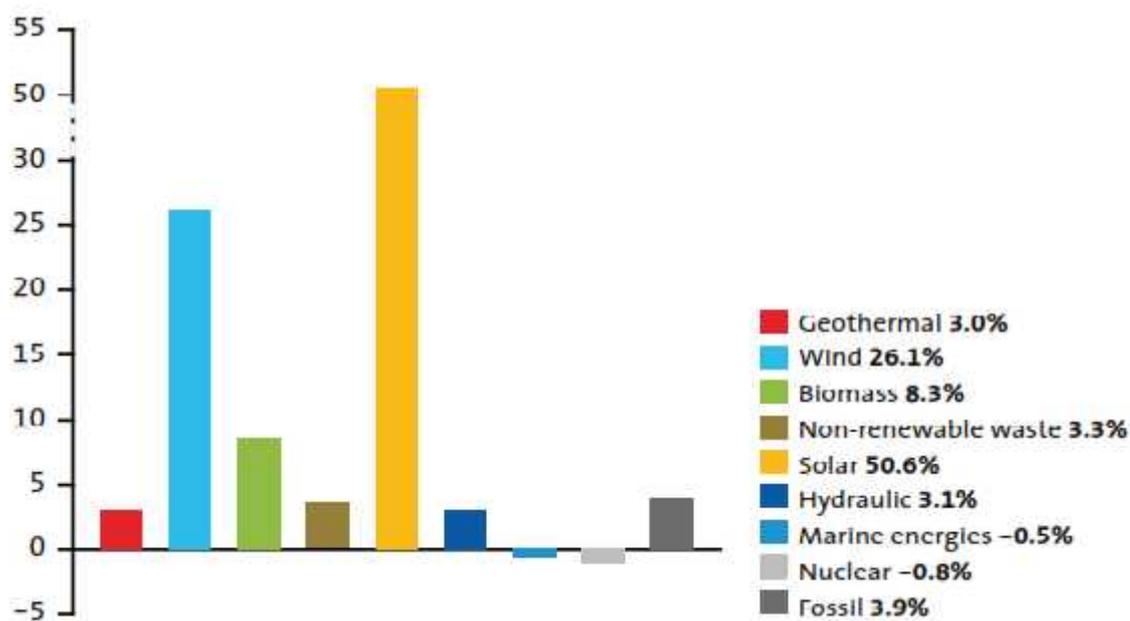


Fig.IV.4. Taux de croissance annuelle moyenne entre 2002 et 2012, des sources de production électrique mondiale [76]

VI.2.3. CAPACITES DES ENERGIES RENOUVELABLES

L'énergie renouvelable pourrait représenter près de 80% de l'énergie dans le monde au sein de quatre prochaines décennies - mais seulement si les gouvernements poursuivent des politiques nécessaires pour promouvoir l'énergie verte, selon un rapport historique publié le lundi 9 May 2011 [77].

L'énergie renouvelable est déjà une croissance rapide - sur les 22613 TWh produites en 2012 (ce qui représente une augmentation de 3,4% par rapport au 2002 et 2,0% par rapport à l'année 2011), 4699,2 TWh provenait de sources renouvelables, comme l'éolien et l'énergie solaire [76].

IV.3. PRODUCTIONS ELECTRIQUES MONDIALES EOLIENNES

Par comparaison, selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la production électrique mondiale était en 2009 de 20 132 TWh dont 2 696 TWh d'origine nucléaire.

Le Global Wind Energy Council (GWEC), dans une étude de 2006, prévoyait 3 scénarios, « référence », « modéré », « avancé », prévoyant une production en 2020 respectivement de 566 TWh, 1 375 TWh et 2 632 TWh.

Global Wind Energy Council (GWEC) a montré que la capacité a atteint 283 GW à la fin de 2012, et la capacité d'énergie éolienne installée au niveau mondiale a augmenté de 12,4 pour cent à plus de 318 GW en 2013 menés par la Chine et le Canada. [78].

La Fig.IV.5 illustre la croissance de l'industrie de la capacité installée depuis 1996. On peut voir que, même au cours d'une période de crise économique mondiale entre 2008 et 2009, l'industrie a connu sa plus grande expansion au cours de la dernière période de 13 ans. C'est un témoignage de la force de l'industrie et les progrès qui ont été réalisés en technologie des éoliennes durant les dernières années.

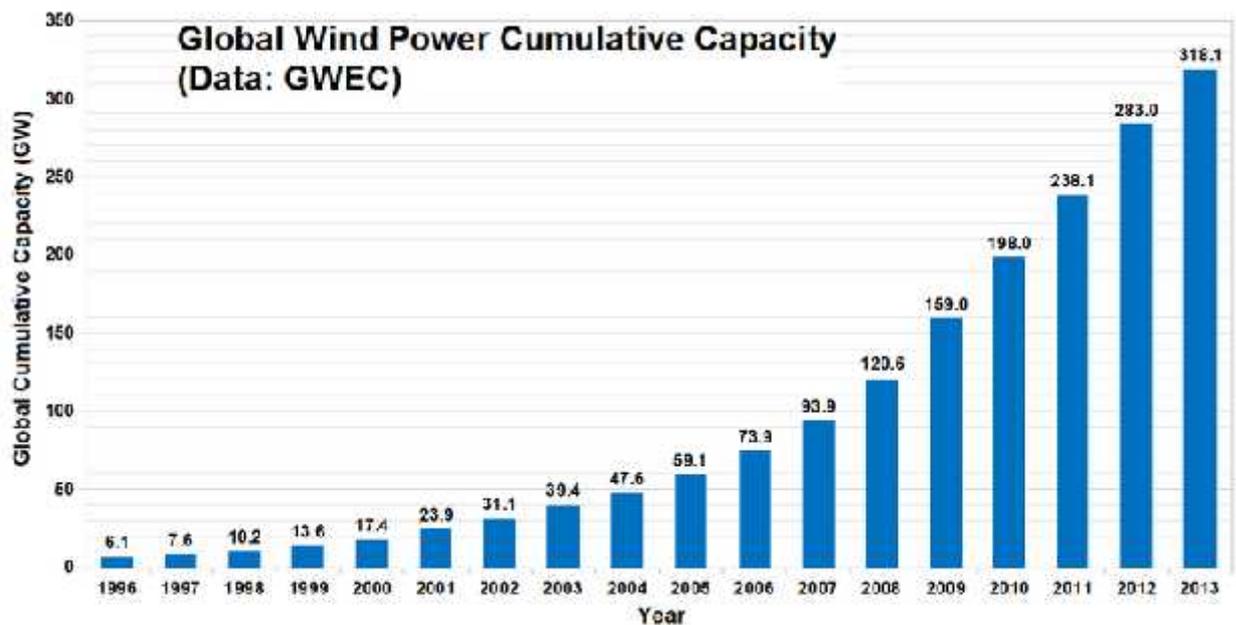


Fig.IV.5. Capacité annuelle installée mondiale de l'énergie éolienne [79]

IV.3.1. POTENTIEL DE L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

Compte tenu de l'étendu et de la superficie importante de la zone exposée à des vents relativement forts selon la Fig.IV.6, un programme ambitieux a été préparé en vue d'exploiter cette source d'énergie inépuisable [80].

- Dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar ;
- Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées ;
- D'autres projets sont en cours d'étude pour la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

Les Ressource éolienne en Algérie variant d'un endroit à un autre pour des raisons géographiques (voir Fig.IV.6) :

- Sud : vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement de Sud-ouest (Supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar)
- Nord : vitesse moyenne peu élevée avec des microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud.

Pour exemple la région de BENI-SAF qui se trouve sur la côte ouest de l'Algérie à 60 km de Tlemcen et 100 km d'Oran, est balayée durant toute l'année par des vents forts. [81]

La première expérience du pompage d'eau avec une éolienne en Afrique a été effectuée à Adrar en 1957 à ksar Sidi aïssa pour l'irrigation de 50 Hec. L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s), (Fig.IV.6). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux, [82].

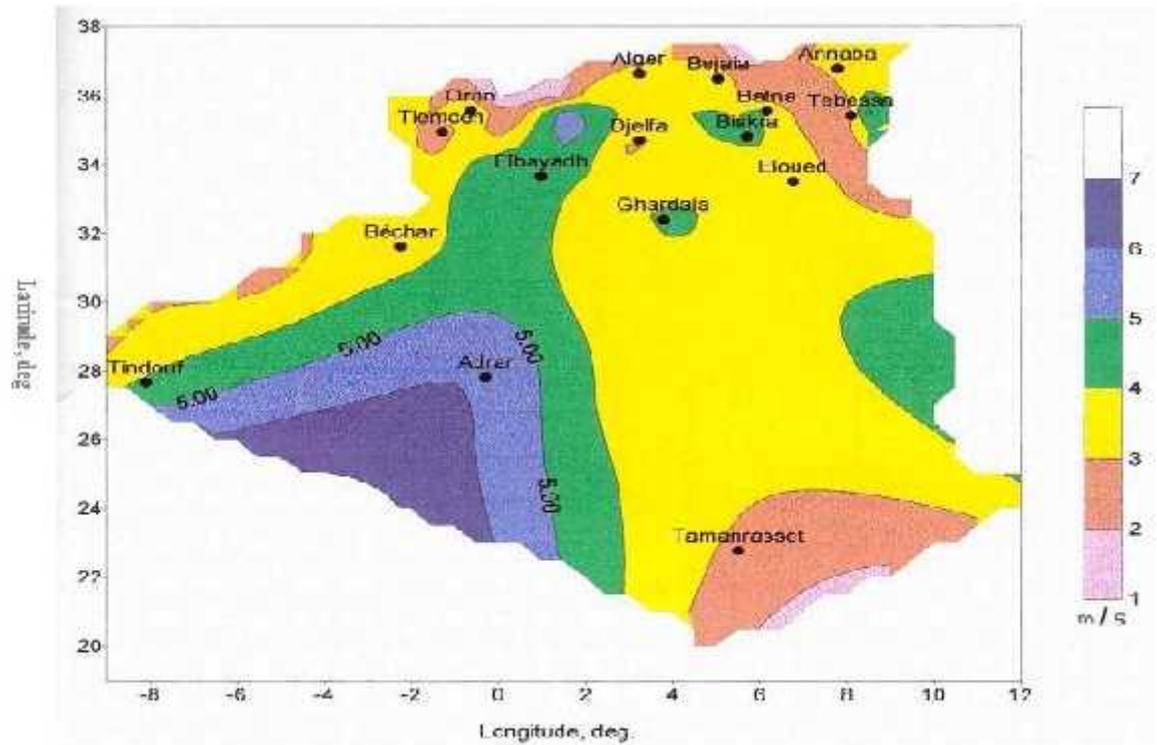


Fig.IV.6. Carte du vent en Algérie

IV.4. DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE

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 [83].

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 utilisés, 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 contrôle-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 contrôle-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. L'éolienne utilisée dans ce travail est celle à vitesse variable.

IV.4.1. LES DIFFERENTS TYPES DES EOLIENNES

Les éoliennes se distinguent par l'orientation de l'axe d'arbre de rotor par rapport au sol, on distingue deux types communs ; éoliennes à axe horizontal (HAWT) et

éoliennes à axe vertical (VAWT). Un exemple d'une éolienne à axe horizontal, avec son arbre parallèle au sol est représenté par la figure IV.7.

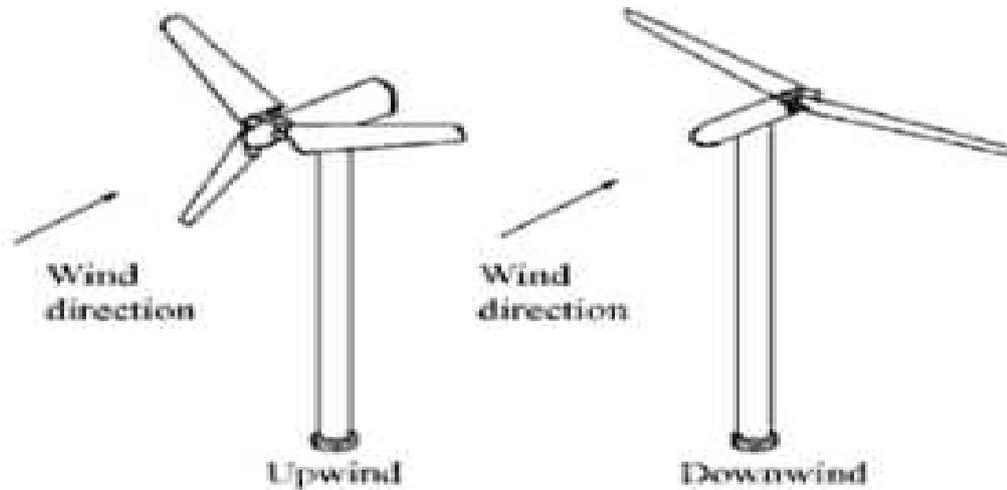


Fig.IV.7. Eolienne à axe horizontal (amont et aval) [84]

C'est le type le plus commun de l'éolienne qui a généralement trois pales est monté sur une tour qui peut être soit en aval ou en amont du rotor.

Avec la configuration en amont, la turbine va naturellement essayer d'aligner son axe avec la direction du vent. Les éoliennes à axe horizontale modernes qui possèdent trois pales ont une capacité de production comprise entre 1,5 et 5 MW et ils sont actuellement utilisés dans les parcs éoliens à divers endroits à travers le monde [84]. Tenant compte de tous les facteurs et en supposant que le meilleur dispositif soit disponible actuellement, l'efficacité d'une éolienne à axe horizontale (HAWT) n'est pas susceptible de dépasser 45% [84].

La Fig.IV.8 montre les différences entre l'éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical sont moins communes et moins efficace que celles à axe horizontal ; leur avantage principal est qu'elles peuvent générer de puissance indépendamment de la direction du vent [85]. Additivement ces dispositifs ne nécessitent pas beaucoup de vent pour produire de l'énergie et, par conséquent, ils peuvent être installés plus près du sol, ce qui les rend plus souhaitable pour les applications urbaines. Une Éolienne à axe vertical a typiquement une efficacité allant jusqu'à 30 % [86].

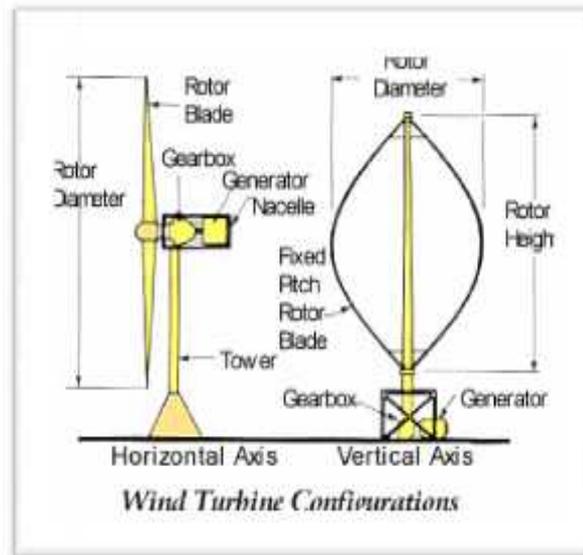


Fig.IV.8. Différence entre une éolienne à axe vertical et horizontal [87]

IV.5. TYPES DE SYSTEMES RENCONTREES

IV.5.1 SYSTEMES UTILISANT LES MACHINES ASYNCHRONES

La génératrice asynchrone à cage d'écurie qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Fig.IV.9). La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). Le grand avantage de ce type est sa simplicité et sa robustesse. Cependant ce type est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Ce dernier peut être amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Fig.IV.9 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [88].

Le système fonctionne à une vitesse fixe. Il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

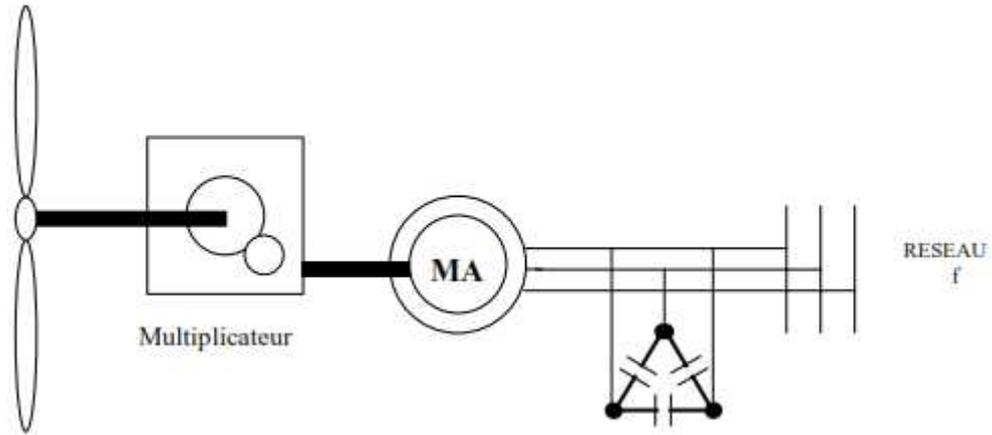


Fig.IV.9. Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [88]

IV.5.1.1 machine asynchrone a double stator

Certains aérogénérateurs sont équipés d'une machine asynchrone à double stator (Fig.IV.10), deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend sa conception difficile ainsi que son cout de revient est trop important [88].

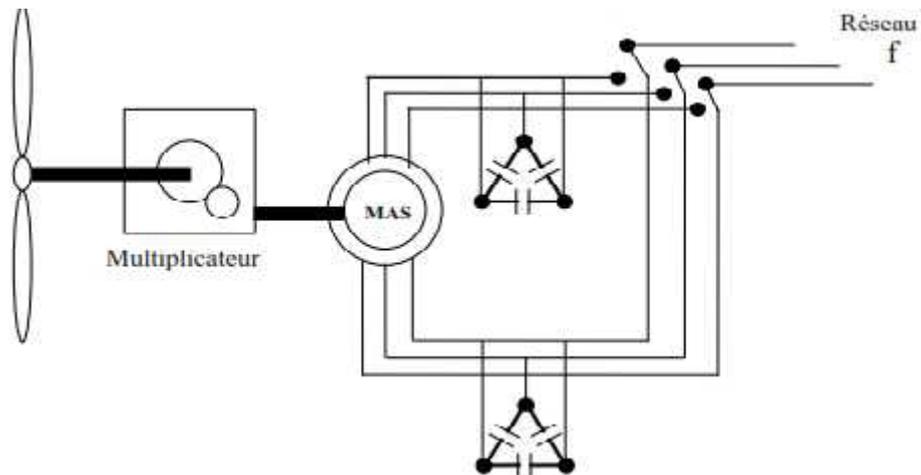


Fig.IV.10. Machine asynchrone à double stator [88]

IV.5.1.2 machine asynchrone connectée au réseau à travers un dispositif d'électronique de puissance

Le système représenté sur la Fig.IV.11 permet un fonctionnement à vitesse variable, en effet la tension produite sera redressée et transformée en tension continue par un redresseur, Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe (Celle du réseau) avec un facteur de puissance unitaire.

La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne, cependant le convertisseur (redresseur, ondulateur) sera dimensionné pour la totalité de puissance produite par l'éolienne ce qui représente un coût en plus, et engendre des pertes importantes (allant jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) [89] et des perturbations qui affectent la qualité d'énergie et le rendement de l'aérogénérateur. En outre, comme toute machine asynchrone, l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation sera fournie par les capacités connectées au stator de la machine. Ces inconvénients ont limité l'utilisation de ce système

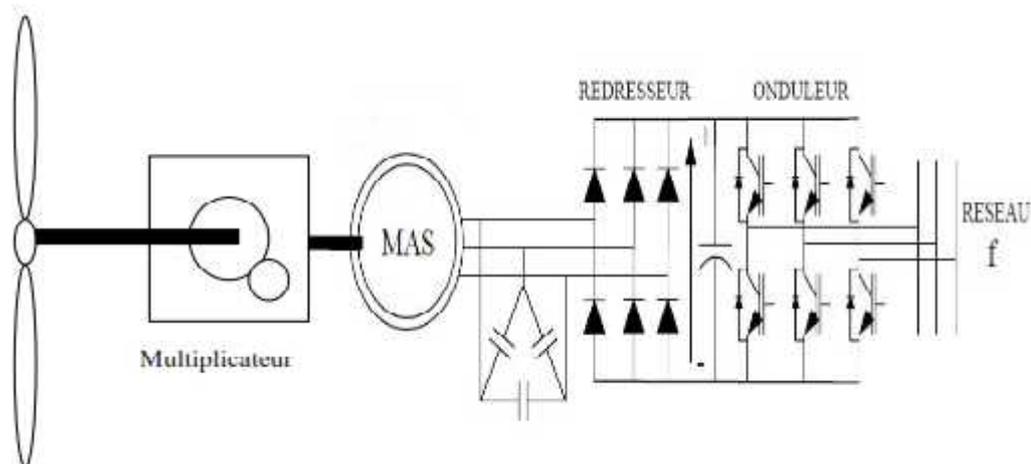


Fig.IV.11. Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – ondulateur [88]

IV.5.1.3 machine à double alimentation de stator (MADA)

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la Machine asynchrone à cage et de la Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné. Elle dispose de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier

les courants rotoriques appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (Fig. IV.12). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique [90].

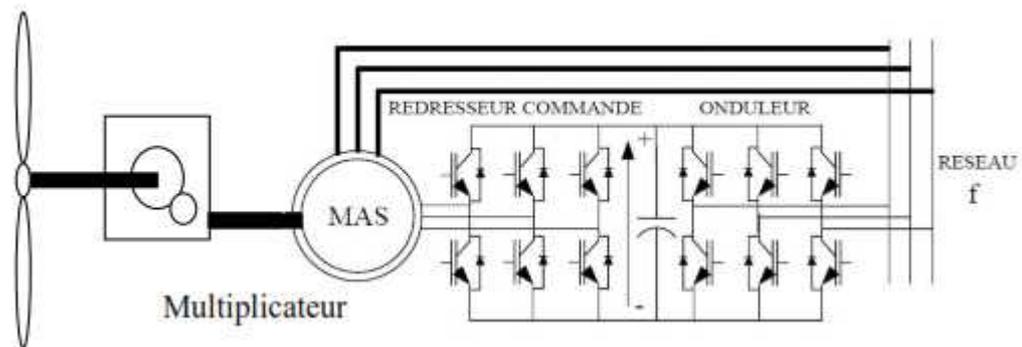


Fig.IV.12. Machine asynchrone MADA connecté au réseau [88]

IV.5.2 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE SYNCHRONE

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.

Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone, un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC. Peut être utilisé (Fig.IV.13). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI, de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible (trois contre quatre).

La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (Fig.IV.13).

La topologie utilisant un redresseur à diodes et un boost comme convertisseur DC/DC est considérée comme la configuration optimale par Carlsson au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [41].

La structure de la Fig.IV.14 peut aussi être utilisée avec une MAS Dans ce cas. Le redresseur MLI assure la magnétisation de la machine asynchrone et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.

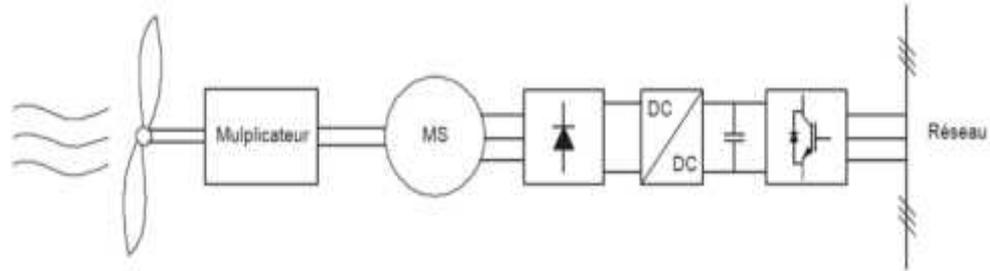


Fig.IV.13 Machine synchrone liée au réseau par un ensemble redresseur à diode, Hacheur et onduleur MLI

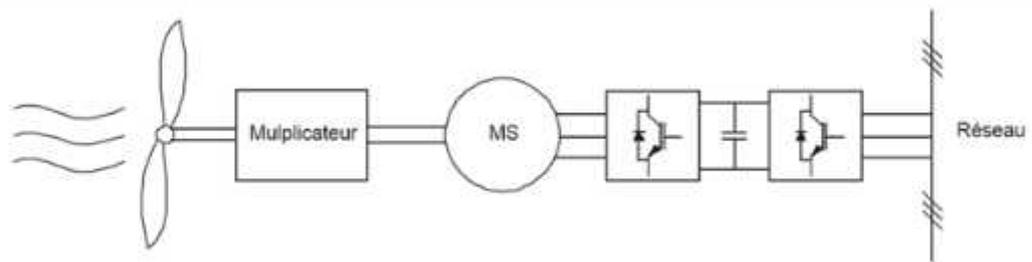


Fig. IV.14 Machine synchrone avec deux convertisseurs MLI en cascade

IV.5.3. SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE A RELUCTANCES VARIABLES

Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et un 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.

IV.6. DESIGN DE LA MACHINE

Afin de maintenir un bon équilibre entre la robustesse et le coût total du dispositif de puissance, la topologie de la machine qui a été choisie dans cette partie est de 6 pôles au stator et 4 pôles au rotor (3 phases). Cette topologie peut fournir 2/3 de la puissance nominale au cas où une des phases échoue. Un autre facteur qui doit être pris en considération pour les applications à

haute vitesse est les pertes dans le noyau, qui sont proportionnelles au carré du nombre de pas par tour. La GRV 6/4 à 12 pas par tour, ce qui est presque la moitié du nombre de pas de la GRV 8/6 (phase 4). Par conséquent, la machine 6/4 (3 phases) a été choisie.

IV.7. ASSOCIATION DE LA GRV A UNE TURBINE EOLIENNE

IV.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).

La MRV est naturellement adaptée à la basse vitesse car la vitesse de rotation est directement liée au nombre de dents du rotor. 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. IV.15.

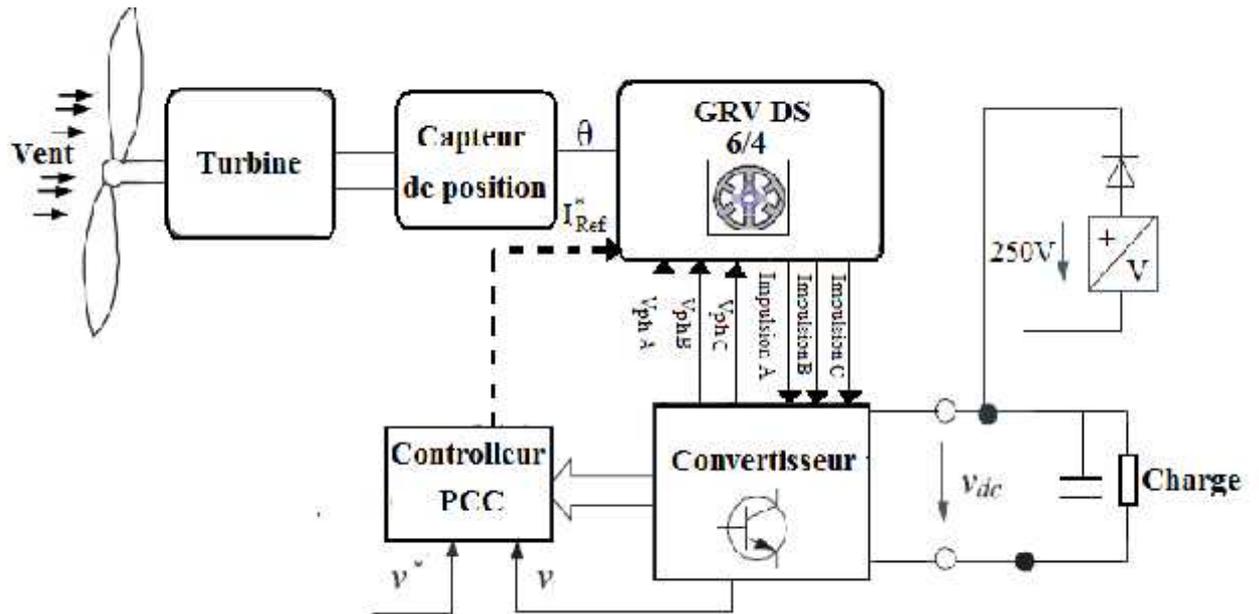


Fig. IV.15 Association d'une GRV et d'une turbine éolienne

IV.7.2 MODELE DE SIMULATION

La Fig. IV.16 représente le modèle global de simulation du bloc GRV-Turbine.

Les paramètres de simulation de cette association sont inscrits dans le Tableau IV.1.

TAB. IV.1 Paramètres de simulation de l'association GRV-turbine.

Paramètre	Valeur Numérique
<i>J</i>	0.01 kg.m ²
<i>F</i>	0.0024 N.m.s
Beta (pitch angle)	2°
<i>G</i>	90

IV.8. RESULTATS DE SIMULATION NON LINEAIRE (TURBINE A VITESSE VARIABLE)

Dans ce cas, on a emprunté à la référence [91] l'expression de la vitesse du vent en fonction du temps :

$$V(t) = 10 + 0.2.\sin(14,7.t) + 2.\sin(26,65.t) + \sin(129,3.t) + 0.2.\sin(366,45.t) \quad (IV.1)$$

Alors, la nouvelle allure de la vitesse de la turbine est indiquée la Fig.IV.18. Après un régime transitoire de 0.5 s, la courbe devient fluctuante autour de 1050 tr/min.

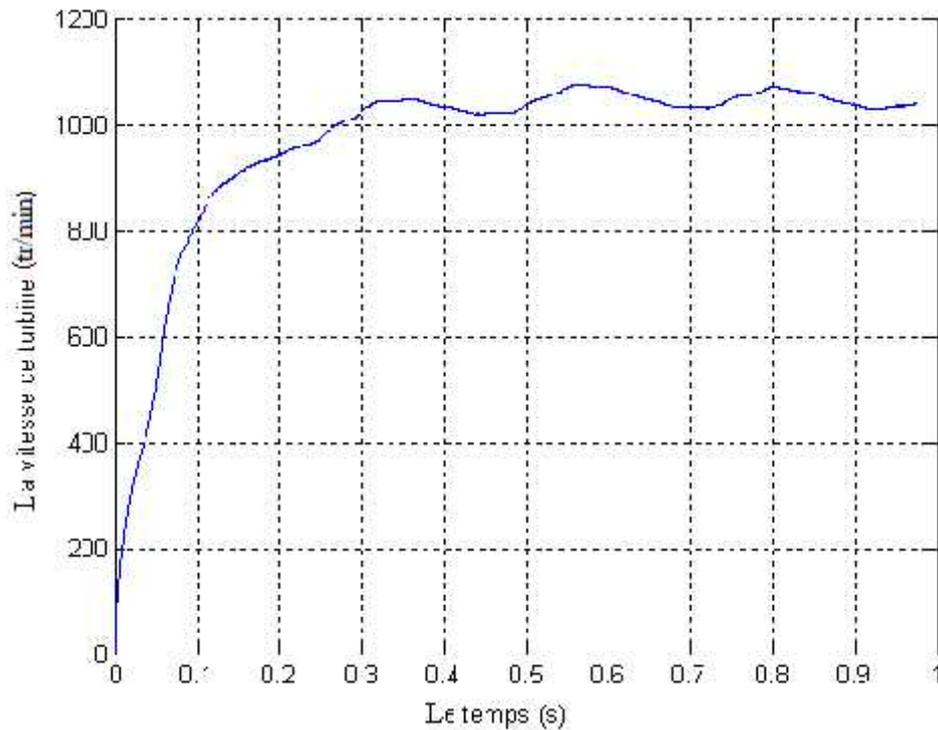


Fig.IV.18. La vitesse de la turbine

La Fig.IV.19 montre la tension de sortie de la GRV.

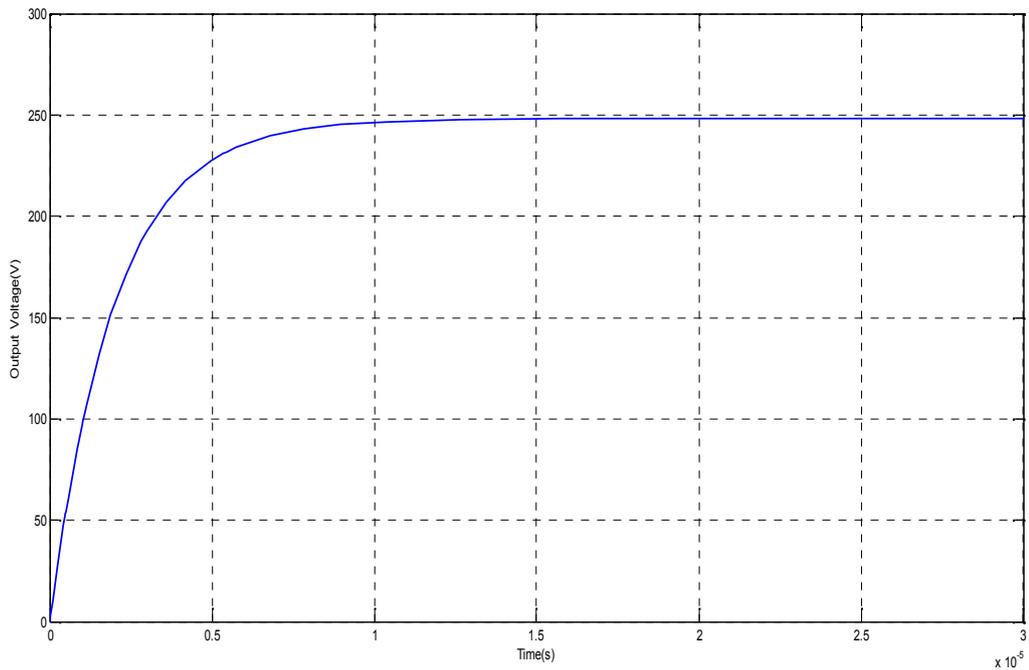


Fig.IV.19 Tension de sortie (V) en fonction du temps (ms)

La tension se stabilise après un court laps de temps. Les ondulations de la tension sont très petites.

Pour la simulation de l'association GRV-turbine éolienne, on a considéré le cas où la vitesse de la turbine est en fonction du temps (vitesse variable).

Dans la Fig.III.20, on montre l'allure du courant de la phase A du stator de la machine. C'est un courant d'une valeur maximale de 11.7 A.

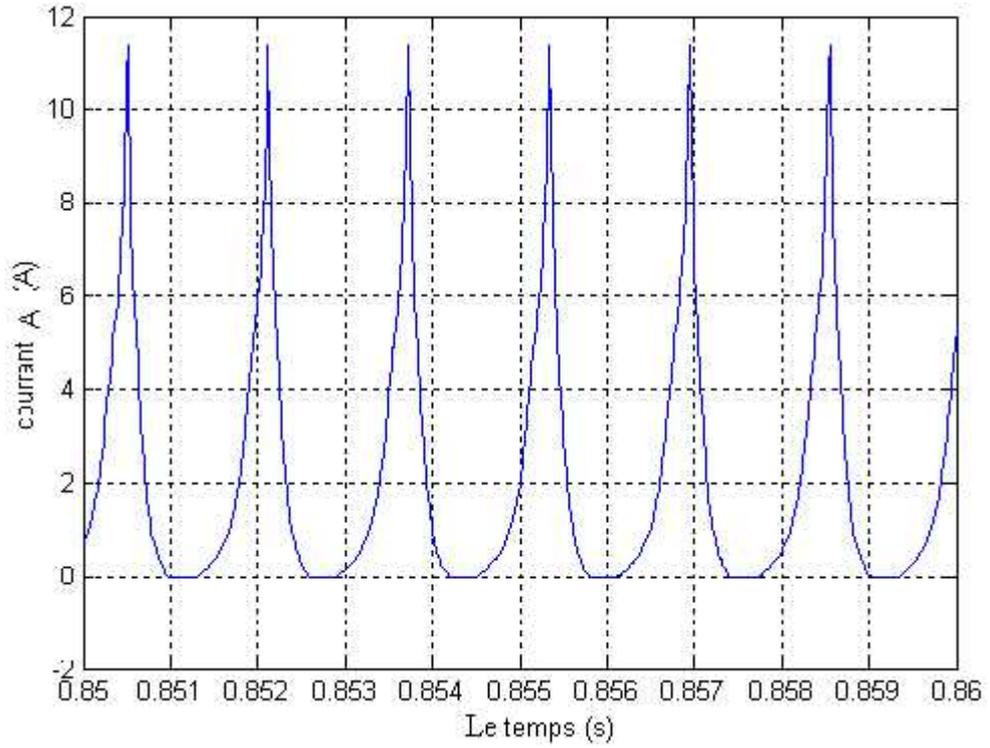


Fig.III.20 Le courant de la phase A.

Dans la Fig.IV.21, on illustre les courants triphasés où les décalages respectifs de $\frac{2\pi}{3}$ s et 2π s apparaissent de nouveau.

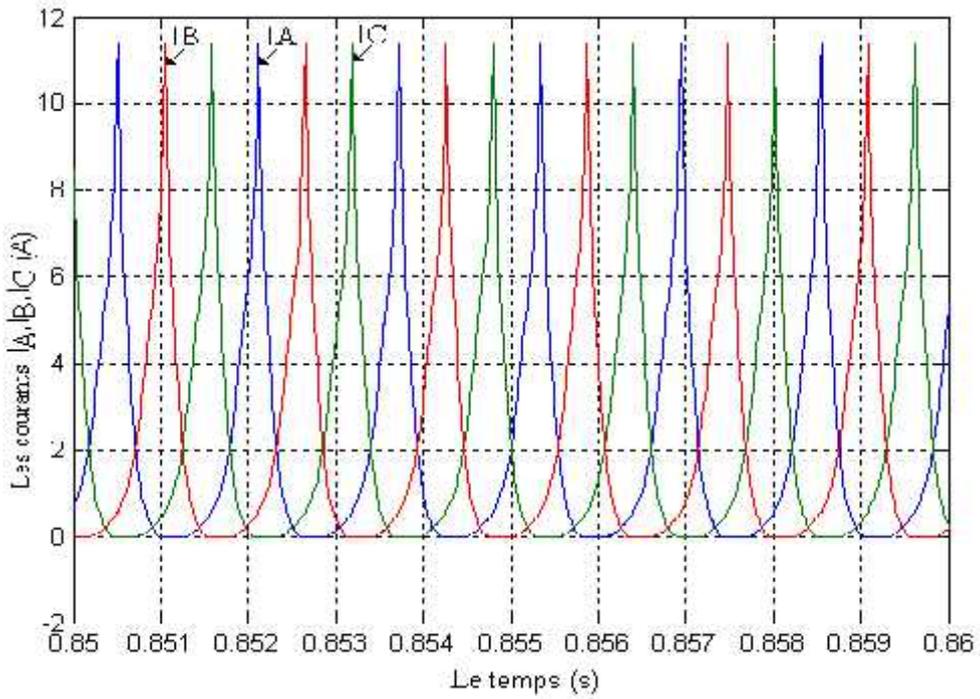


Fig.IV.21 Les courants des trois phases.

IV.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description sur l'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 décrit d'une façon générale la composition d'une éolienne, ainsi que les configurations de générateurs associés, essentiellement de type synchrone et asynchrone. Ensuite nous avons présenté la simulation complète de l'association turbine-GRV à haute vitesse.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Malgré l'existence de la machine à réluctance variable depuis longtemps, son réel évolution n'a été connu que récemment, et ce est due principalement au développement des 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 la croissance des *énergies renouvelables*, la MRV pourrait se substituer aux machines classiques 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 cette thèse est de modéliser, optimiser et simuler une GRV 6/4 et 8/6 à double saillance en association avec leurs convertisseurs, sous environnement MATLAB/SIMULINK. Ensuite, nous envisageons d'adapter ce système générateur à une turbine éolienne.

La GRV est représentée par un modèle non linéaire basé sur la caractéristique de magnétisation de la machine. Afin que les résultats soient très proches de la réalité, le modèle de la GRV a utilisé les caractéristiques géométriques, électriques et magnétiques d'une machine existante. Le modèle de la GRV a été validé par sa simulation dans plusieurs conditions de fonctionnement.

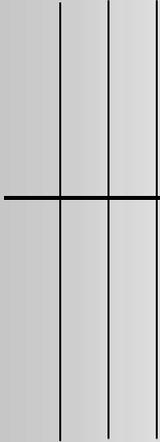
Mais auparavant, nous avons entamé notre travail par un état de l'art sur les machines à réluctance variable et nous avons fait une présentation des différentes topologies de MRV existantes. Ce chapitre nous a permis de choisir parmi les différentes structures de GRV existantes une configuration à double saillance simple type GRVDS 6/4. Pour notre part, nous avons examiné le fonctionnement de ce prototype en mode générateur ainsi que les conditions de sa mise en œuvre.

Le deuxième chapitre aborde les aspects modélisation et simulation de la GRVDS 6/4 et 8/6 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, mais quelques ondulations peuvent être enregistrées

sur la tension de sortie et le couple électromagnétique de la GRV ce qui nous a conduits de faire une optimisation sur la machine pour obtenir des meilleurs résultats dans le chapitre prochain.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation de GRV à l'aide d'un convertisseur de puissance économique appelé dans la littérature « convertisseur de suppression de résistance », il comprend la moitié des composants en matières d'électronique de puissance par rapport aux convertisseurs classiques à demi pont asymétrique (AHBC). Le contrôleur dans les GRV à un rôle essentiel du fait qu'il assure le contrôle du courant et la tension et minimise les ondulations, donc plusieurs contrôleurs ont été étudiés et simulés afin d'avoir le contrôleur le plus adapté par notre application. Notre étude nous a amené à choisir le contrôleur nommé « PCC » qui possède de haute performance.

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 (7.5 kW) était nettement supérieure à celle de notre machine (environ 4 kW), nous avons du effectuer une adaptation de cette turbine par la réduction de ses paramètres (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.



BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2001.
- [2] T. Wildi, "Électrotechnique", Les presses de l'université Laval, 2008.
- [3] B. Multon., «historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à reluctance variable », LÉSiR (URA CNRS D1375), École Normale Supérieure de Cachan
- [4] D. E. Cameron and J. H. Lang, "The control of high-speed variable-reluctance generators in electric power systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp. 1106–1109, Nov./Dec. 1993.
- [5] D. A. Torrey, "Development of variable-Reluctance Wind Generator", Windpower 93, San Francisco, CA, July 1993.
- [6] J. Faiz and R. Fazai, "Modeling of losses in switched reluctance Generators", 2nd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering (TPE-2004), September 2004, Tabriz, Iran.
- [7] Dr. Babak Fahimi, member IEEE, Dr. Raymond B. Sepe Jr., member IEEE. "Sensorless switched-reluctance generators: a technology ready for aerospace applications", Content appeared in the October 2002 issue of military E-Aerospace.
- [8] R. Cardenas, W.F. Ray, G.M. Asher, "Switched Reluctance Generators For Wind Energy Application", Proc. IEEE, PESC'95, pp. 559-564, 1995.
- [9] T. J. E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machines. Oxford, U.K.: Newnes, 2001.
- [10] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 49, no. 1, pp. 3–14, Feb. 2002.
- [11] D. E. Cameron and J. H. Lang, "The control of high-speed variable-reluctance generators in electric power systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp. 1106–1109, Nov./Dec. 1993.
- [12] P. C. Kjaer, C. Cossar, J. J. Gribble, Y. Li, and T. J. E. Miller, "Switched reluctance generator control using an inverse machine model," in Proc. Int. Conf. ICEM'94, Paris, France, 1994, pp. 380–385.
- [13] 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. Appl., vol. 31, no. 3, pp. 553–561, May/Jun. 1995.
- [14] T. Sawata, P. C. Kjaer, C. Cossar, and T. J. E. Miller, "A control strategy for the switched reluctance generator," in Proc. Conf. ICEM'98, Istanbul, Turkey, 1998, vol. 3, pp. 2131–2136.

Références bibliographiques

- [15] T. Sawata, P. C. Kjaer, C. Cossar, and T. J. E. Miller, "A study on operation under faults with the single-phase SR generator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 782–789, Jul./Aug. 1999.
- [16] I. Husain, A. Radun, and J. Nairus, "Fault analysis and excitation requirements for switched reluctance generators," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 17, no. 1, pp. 67–72, Mar. 2002.
- [17] R. Cardenas, W. F. Ray, G.M. Asher, "switched reluctance generators for wind energy Applications", University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom.
- [18] H. Keunsoo, K. Rae-Young, and R. Ramu, "Position Estimation in Switched Reluctance Motor Drives Using the First Switching Harmonics Through Fourier Series," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 5352-5360, Sept. 2011.
- [19] A. Arifin, I.H. Al-Bahadly, and S.C. Mukhopadhyay, "A Comprehensive Simulation Platform for Switched Reluctance Generator System," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 7, pp. 198-208, October 2012.
- [20] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 3-14, Feb. 2002.
- [21] P. Pillay and W. Cai, "An investigation into vibration in switched reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, pp. 589-596, 1999.
- [22] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, and A. Hellany, "Study analysis on the excitation of a switched reluctance generator for wind energy conversion," in *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA) Zouk Mosbeh*, 2009, pp. 112-116.
- [23] N. Radimov, N. Ben-Hail, and R. Rabinovici, "Simple model of switched-reluctance Machine based only on aligned and unaligned position data," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, pp. 1562-1572, 2004.
- [24] P. S. J. R. French, "Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment," *Electric Power Applications, IEE Proceedings B* [see also *IEE Proceedings-Electric Power Applications*], vol. 131, pp. 209-219, 1984.
- [25] B. Bilgin, A. Emadi, and M. Krishnamurthy, "Comprehensive Evaluation of the Dynamic Performance of a 6/10 SRM for Traction Application in PHEVs," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 2564-2575, April 2012.
- [26] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 247-275, 2002.

Références bibliographiques

- [27] M. Ehsani, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, pp. 19-27, 1997.
- [28] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*: CRC Press, 2001.
- [29] C. Pollock and A. Michaelides, "Switched reluctance drives: a comparative evaluation," *Power Engineering Journal*, vol. 9, pp. 257-266, December 1995.
- [30] A.M.Shaidi Arifin, "Switched Reluctance Generator Drive in the Low and Medium Speed Operation: Modelling and Analysis", PHD thesis Massey University, Manawatu New Zealand, 2013.
- [31] S. Long, Z. Zhu, and D. Howe, "Vibration Behaviour of Stators of Switched Reluctance Motors", *IEE Proceedings Electric Power Application* 148, 2001.
- [32] I. Husain, "Minimization of Torque Ripple in SRM Drives", *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 49, 28, 2002.
- [33] R. Arumugam, J.F. Lindsay and R. Krishnan, "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, Volume, Oct 1988*.
- [34] B.C. Mecrow, "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", *IEEE Trans. on Industry Applications* 32, 1996.
- [35] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 3-14, Feb. 2002.
- [36] E. Elwakil and M. Darwish, "Critical review of converter topologies for switched reluctance motor drives," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 2, pp.50-58, January-February 2007.
- [37] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM inverter topologies: a comparative evaluation," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1034-1047, 1991.
- [38] M. Barnes and C. Pollock, "Power electronic converters for switched reluctance drives," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1100-1111, 1998.
- [39] A. Radun, "Generating with the switched reluctance motor," in *Ninth Annual Conference Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) Orlando, FL, 1994*, pp. 41-47.
- [40] V. Nedic and T. A. Lipo, "Experimental verification of induced voltage self-excitation of a switched reluctance generator," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, 2000*, pp. 51-56 vol.1.

Références bibliographiques

- [41] L. Moreau, "Modélisation, Conception et Commande de GRV", Thèse de doctorat, Univ. De Nantes, 2005.
- [42] P. Z. Ping, J. Ying, Z. Hui, "Study On Switched Reluctance Generator", Journal of Zhejiang University Science, 2004.
- [43] 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.
- [44] A. V. Radun, C. A. Ferreira, and E. Richter, "Two-channel switched reluctance starter/generator results," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, pp.1026-1034, 1998.
- [45] M. Nassereddine, J. Rizk, and M. Nagrial, "Switched Reluctance Generator for Wind Power Applications," Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 31, pp. 126-130, 2008.
- [46] M. Ruba, C. Oprea, and L. Szabo, "Comparative study on Switched Reluctance Machine based fault-tolerant electrical drive systems," in IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) Miami, Fl, 2009, pp. 987-992.
- [47] N. Sadowski, Y. Lefewe, C.G.C News, and R. Carlson, "Finite Element Coupled to Electrical Circuit Equations in the Simulation of Switched Reluctance Drives: Attention to Mechanical Behavior", IEEE, vol. 32, 1996.
- [48] J. Faiz and J.W. Finch, "Aspects of Design Optimization for Switched Reluctance Motors". IEEE Trans. on Energy Conversion, 1993.
- [49] R. Arumugam, J.F. Lindsay and R. Krishnan, "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, Volume, Oct 1988.
- [50] G.E. Dawn, and A.R. Eastham, "Switched Reluctance Motor Torque Characteristic: Finite Element Analysis and Test Results", IEEE, on Industry Application, vol. 23, 1987.
- [51] M. E Elbuluk, M. D. Kankam, "Potential Starter/Generator Technologies For Future Aerospace Applications", IEEE Magazine on Aerospace and Electronic Systems, Vol.12, No.5, pp.24-31, 1997.
- [52] 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. Appl., vol. 31, no. 3, pp. 553–561, May/Jun. 1995.

Références bibliographiques

- [53] 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.
- [54] B. Fahimi, "A Switched Reluctance Machine Based Starter/Generator For More Electric Cars", IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp.73-78, 2001.
- [55] O. Ichinokura, T. Kikuchi, K. Nakamura, T. Watanabe, H. Guo, "Dynamic Simulation Model Of Switched Reluctance Generator", IEEE Trans. Magn. Vol.39, N°.5, pp3253-3255, 2003.
- [56] 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.
- [57] 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.No.3, pp.989-1009, July 2001.
- [58] 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.
- [59] Z. Pan, Y. Jin, and H. Zhang, "Study on switched reluctance generator," Science Journal of Zhejiang University, vol. 5, p. 594, 2004.
- [60] Zeki Omac, Hasan Kurum, and A. H. Selcuk, "Digital Current Control of Switched Reluctance Motor," International Journal of Electrical and Power Engineering, vol. 5, pp. 54-61, 2011 2011.
- [61] K. I. Hwu, "Applying POWERSYS and SIMULINK to Modeling Switched Reluctance Motor," Tamkang Journal of Science and Engineering, vol. 12, pp. 429-238, 2009.
- [62] K. N. Srinivas and R. Arumugam, "Finite Element Analysis Combined Circuit Simulation of Dynamic Performances of Switched Reluctance Motors," Electric Power Components and Systems, vol. 30, pp. 1033-1045, 2002.
- [63] Y. Xu and D. A. Torrey, "Study of the mutually coupled switched reluctance machine using the finite element-circuit coupled method," IEE Proceedings -Electric Power Applications, vol. 149, pp. 81-86, 2002.
- [64] L. Szabo and M. Ruba, "Using co-simulation in Fault Tolerant Machine Study," in 23rd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS) Madrid, Spain, 2009.
- [65] P. Zai-ping, J. Ying., Z. Hui. "Study on switched reluctance generator" Journal of Zhejiang University Science ISSN 1009-3095, No. 599072, 2003.

Références bibliographiques

- [66] G. Segulier, F. Notellet, "Electrotechnique Industrielle", 2ème édition pages 371-384.
- [67] B. Malik, "Commande De La Machine A Reluctance Variable En Vue D'une Application Alterno-Demarreur Intégré", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.
- [68] R. Krishnan, « Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, Analysis, Design & Applications », pp. 351-384, CRC Press, 2001.
- [69] T. Ackermann, L. Söder, "An Overview of Wind Energy-Status" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [70] C. Bourillon, "Wind Energy – Clean Power for Generations. Renewable Energy" Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [71] 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.
- [72] Site Internet, http://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_non_renouvelable.
- [73] M.Makhlouf, "Modélisation Et Optimisation de Systèmes de Production d'énergies renouvelables couplés au Réseau ", Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine ,2012.
- [74] Key World Statistics 2013, International Energy Agency (IEA)
- [75] [http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/World-Energy-Needs-and-Nuclear-Power/.](http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/World-Energy-Needs-and-Nuclear-Power/))
- [76] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Eng/sommaire.asp#chapitre3>
- [77] <http://www.guardian.co.uk/environment/2011/may/09/ipcc-renewable-energy-power-world> Site.
- [78] <http://www.reuters.com/article/2014/02/05/us-wind-capacity-idUSBREA140RW20140205>
- [79] http://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_Eolienne, (Global wind report Annual_market update 2012 (GWEC),_Global Wind Energy Council, avril 2013)
- [80] <http://www.andi.dz/index.php/fr/les-energies-renouvelables>
- [81] M. A. Tabet Helaln et N. Ghellai, 'Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien' , Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)143-146.
- [82] R. Redjem, "Modélisation et Optimisation d'une Structure de Machine à Réductance Variable Dédiée aux Energies Renouvelables", thèse Doctorat de l'université de

Références bibliographiques

- Mentouri –Constantine, option modélisation et commande des machines électriques, 8 juillet 2010.
- [83] T. Ackermann, L. Söder, “An Overview of Wind Energy-Status” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [84] Manwell, J.F., Rogers, A.L, McGowan, J.G., 2009. “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Second Edition”. Amherst. Wiley
- [85] Leishman, J.G., 2006. *Principals of Helicopter Aerodynamics. Second Edition*. New York. Cambridge University Press.
- [86] Renewable Energy UK, 2006. “Vertical Axis Wind Turbines”. [online] disponible à <<http://www.reuk.co.uk/VAWT-Vertical-Axis-Wind-Turbine.htm>> [Accessed 28 July 2010]
- [87] Timmer, N. Ruud, V.R, 2004. “Design of Airfoils for Wind Turbine Blades” , Delft University of Technology. [online] Available at: http://gcep.stanford.edu/pdfs/energy_workshops_04_04/wind_van_rooij.pdf 2010]
- [88] M.Bouaraki, “ Etude d’un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF ”. », Thèse magistère de l’université de Batna, Option Equipements Electriques Industriels 2012.
- [89] F. Poitiers, “Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de L’Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau ’’, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, France, 2003.
- [90] F.J POSA, “Modélisation, conception et commande d’une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable.”, Thèse de Doctorat, INP, Grenoble, France, Octobre 2003.
- [91] 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.

يركز هذا العمل على دراسة المولد مقاومة مغناطيسية متغيرة كيفية سلوكه وتحسين أدائه. الهدف هو مولدين 4/6 8/6 مرافقة بمحولين اثنين: المقاومة. تم اختيار "PCC" دانها العالي بعد دراسة مختلف وحدات التحكم. تم إجراء محاكاة النظام العام تحت بيئة / MATLAB SIMULINK. كانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية مما جعل ممكنا ربط هذا المحول مع توربينات الرياح.

Abstract

This work focuses on the study of the switched reluctance generator of his behaviour and optimize its performance. The goal is to model a double salient SRM 6/4 and 6/8 associated with two converters: asymmetric half-bridge converter and Suppression Resistor Converter. The "PCC" controller has been chosen for it's high performance after a study of several controllers. The simulation of the entire system was made by MATLAB/SIMULIK software. The results obtained are very satisfactory and made it possible advantageously to associate this converter unit to a wind turbine.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la génératrice à réluctance variable de son comportement et d'optimiser sa performance. Il s'agit de modéliser et simuler l'ensemble des GRV 6/4 et 6/8 à double saillance – ainsi les deux convertisseurs : le demi-pont asymétrique et le convertisseur de suppression de résistance. Le contrôleur « PCC » a été choisi pour sa haute performance après une étude de divers contrôleurs. La simulation du système global a été effectuée sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et ont permis d'associer avantageusement cet ensemble convertisseur à une turbine éolienne.