



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

AGGAB Mohammed Abdallah et GHRISSI Abdelmalek

Thème

**Commande d'une Machine Asynchrone à Double
Alimentation sans Balais en vue de son Application dans le
Domaine de l'Energie Eolienne**

Soutenu le 28/05/2016. Devant le jury composé de :

Mr. Oussama Mammeri

Maitre Assistant

Président

Dr. Tir Zoheir

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. Serhoud Hichem

Maitre de conférences

Examineur

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux

La louange est à **Allah** l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Zoheir TIR, Maître de conférences à l'Université d'el oued, pour ces conseils précieux, les orientations ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes enseignants tout le long de ces années d'études.

Je voudrais aussi remercier mes parents, ma mariée, mes frères et mes chères sœurs.

Mes remerciements vont également à mes amis et mes collègues.

« Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien »

Platon

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I.....	3
ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CONVERSION	3
D'ENERGIE EOLIENNE	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.1 ETAT DE L'ART ET SITUATION DE L'EOLIEN DANS LE MONDE ACTUEL.....	4
I.1.1 HISTORIQUE DE L'EOLIEN.....	4
I.1.2 DIFFERENTES TYPES D'AEROGENERATEURS	4
I.1.2.1 Les turbines éoliennes à axe horizontal :.....	4
I.1.2.2 Les turbines éoliennes à axe vertical.....	5
I.2.5 CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE	5
I.2.6 CARACTERISTIQUES DE LA TURBINE EOLIENNE	6
I.2.7 ZONES DE FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE	7
I.5 GENERALITES SUR LES MACHINES UTILISEES DANS LE SCEE	8
I.5.1 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE SYNCHRONE	8
I.5.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	8
I.5.1.2 Machine synchrone à aimants permanents	9
I.5.1.3 Machine synchrone à aimants permanents discoïde	9
I.5.2 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE	9
I.5.2.1 MRV pure :	10
I.5.2.2 MRV Vernier :	10
I.5.2.3 MRV hybride :	10
I.5.3 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE ASYNCHRONE	10
I.5.3.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	10
I.5.3.2 Machine asynchrone à double stator.....	13
I.5.3.3 MADA à énergie rotorique dissipée.....	13
I.5.3.4 MADA avec structure de Kramer.....	15
I.5.3.5 MADA avec cycloconvertisseur	16
I.5.3.6 MADA avec structure de Scherbius	16
I.5.3.7 MADA en cascade.....	17
I.5.3.8 MADA sans balais (BDFM).....	19
I.5.3.8 MADA sans balais à reluctance variable (BDFM).....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
I.7 CONCLUSION	20
CHAPITRE II.....	21
MODELISATION ET SIMULATION DE LA BDFRM	21
II.1 INTRODUCTION	21
II.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET MODELISATION DE LA BDFRM.....	22
II.4.1 TOPOLOGIE DE LA BDFRM.....	22
II.4.2 MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA BDFM	22
II.4.2.1 Modes Asynchrone.....	23
II.4.2.2 Mode synchrone.....	23
II.4.5 MODELE DYNAMIQUE DE LA BDFM	24
II.4.6 RESULTATS DE SIMULATION.....	25
II.5 MODELISATION DES CONVERTISSEURS.....	27
II.5.1 CONVERTISSEURS COTE MACHINE.....	27
- TENSIONS DES PHASES STATORIQUES :	27
- TENSIONS COMPOSEES PRODUITES PAR CCM :	28
- TENSIONS SIMPLES PRODUITES PAR CCM :	28

II.5.1.1 Principe de la MLI.....	29
II.5.1.2 RESULTATS DE SIMULATION.....	31
II.5.2 CONVERTISSEUR COTE RESEAU.....	31
II.6 CONCLUSION	32
CHAPITRE III	33
COMMANDE VECTORIELLE DE LA BDFRM.....	33
III.1 INTRODUCTION	33
III.1. ARCHITECTURE DU DISPOSITIF DE COMMANDE	34
III.2. COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE MACHINE	35
III.2.1 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE A FLUX ORIENTE.....	35
III.2.2 STRATEGIE DE COMMANDE EN PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DE LA BDFM.....	37
III.2.2.1 COMMANDE INDIRECTE DE LA BDFM.....	39
III.2.2.3 SYNTHESE DE LA REGULATION PI	39
III.4. SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN BASE SUR UNE BDFM	41
III.5 CONCLUSION	42
CONCLUSION GENERALE	43
RECOMMANDATIONS DE TRAVAUX FUTURS	44

Liste des symboles

Référentiels.

(d, q) : Référentiel lié au champ tournant.

(α, β) : Référentiel lié au stator.

Indice des grandeurs.

c : Grandeurs du bobinage de commande

p : Grandeurs du bobinage de puissance

m : Grandeurs magnétisantes.

R : Grandeurs rotoriques.

S : Grandeurs statoriques.

d, q : Grandeurs transformées dans référentiel tournant.

α, β : Grandeurs transformées dans référentiel lié au stator.

Paramètres et Grandeurs Physiques.

Grandeur temporelle :

t : Temps

BDFM:

Paramètre :

m : Rapport de transformation.

$\frac{3}{2}M$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

L_{mp}, L_{mc} : Inductances mutuelles cycliques entre stator et rotor de la MADAB.

L_{sp}, L_{sc} : Inductances cycliques de la MADAB MADA.

L_{rp}, L_{rc} : Inductances cycliques rotoriques de deux MADA.

p : Nombre de paires de pôles de la cascade

R_{sp}, R_{sc} : Résistances statoriques de la MADAB.

R_{rp}, R_{rc} : Résistances rotoriques de la MADAB.

R_{sc} : Résistance statorique du bobinage de commande

R_{rc} : Résistance rotorique du bobinage de commande

R_{sp} : Résistance statorique du bobinage de puissance

R_{rp} : Résistance rotorique du bobinage de puissance

J_m : Moment d'inertie de la machine.

ω_{sync} : Vitesse de synchronisme.

Variables :

i_{Ra}, i_{Rb}, i_{Rc} : Courants réels dans les phases rotoriques.

i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc} : Courants réels dans les phases statoriques.

v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc} : Tensions simples réelles du stator alimentation de la machine.

e_{Sa}, e_{Sb}, e_{Sc} : Forces électromotrices de la machine.

v_{an}, v_{bn}, v_{cn} : Tensions simples délivrées par l'onduleur connecté au rotor.

\vec{v}_S : Vecteurs tensions statoriques

\vec{v}_R : Vecteurs tensions rotoriques

$\psi_{Sa}, \psi_{Sb}, \psi_{Sc}$: Flux statoriques réels.

C_{em} : Couple électromagnétique.

P_S : Puissance active au stator.

Q_S : Puissance réactive au stator.

P_R : Puissance active au rotor.

Q_R : Puissance réactive au rotor.

P_m : Puissance mécanique.

P_{JS} : Pertes Joule au stator.

P_{JR} : Pertes Joule au rotor.

P_{sp} : Puissance entrant au stator du bobinage de puissance

P_{rp} : Puissance entrant au rotor du bobinage de puissance

P_{sc} : Puissance entrant au stator du bobinage de commande

P_{rc} : Puissance entrant au rotor du bobinage de commande

θ : Position "électrique" du rotor (2) par rapport au stator (S).

ω : Pulsation mécanique.

ω_R : Pulsation rotorique.

ω_{sc} : Pulsation statorique du bobinage de commande

ω_r : Pulsation rotorique du rotor

ω_{sp} : Pulsation statorique du bobinage de puissance

ω_{rp} : Pulsation rotorique du bobinage de puissance

Ω : vitesse de rotation mécanique de l'arbre commun

p_c : Nombre de paire de pole du bobinage de commande

p_1 : Nombre de paire de pole du bobinage de commande

f_R : Fréquence rotorique.

g : Glissement.

Ω_G : Vitesse de rotation de la génératrice.

Commande MADAB:

k_p : Gain proportionnel du contrôle des courants I_d et I_q .

τ : Constante de temps du contrôle des courants I_{2d} et I_{2q} .

Réseau :

V_{res} : Valeur efficace de la tension au point de raccordement.

ω_{res} : Pulsation du réseau et du stator.

f_{res} : Fréquence du réseau.

P_{eol} : Rapport de transformation du transformateur.

P_{eol} : Puissance active fournie par l'éolienne au réseau.

Q_{eol} : Puissance réactive fournie par l'éolienne au réseau.

ACRONYMES :

AC : Alternative Current

FEM : Force électromotrice

EP : Electronique de puissance

MS : Machine synchrone

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

SCEE : Systèmes De Conversion d'Énergie

Eolienne

GVC : Génération à Vitesse Constante

GVV : Génération à Vitesse Variable

CDER : Centre de Développement d'Énergie

Renouvelable

MAS : Machine Asynchrone à cage

MASDS : Machine asynchrone à double stator

MADA : Machine Asynchrone à Double

Alimentation

MSAP : Machine Synchrone à Aimant Permanent

MSRB : Machine Synchrone à Rotor Bobiné

MRV : Machine à reluctance variable

BDFM : Brushless doubly fed Machine

BC : Bobinage de Commande

BP : Bobinage de Puissance

EDF : Electricité Du France

Fig. I. 1 : Technologie éolienne à axe horizontale, [BEL 07].....	4
Fig. I. 2: Technologie éolienne à axe vertical, [BEL 07].....	5
Fig. I. 3 : Exemple de système éolien, [LAV 05].....	5
Fig. I. 4 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné, [POI 03].	6
Fig. I. 5 : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs, [POI 03].....	6
Fig. I. 6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne, [LAV 05].....	7
Fig. I. 7 : SGEE avec générateur synchrone.....	8
Fig. I. 8 : Machine synchrone à aimants permanents discoïde à double rotor.....	9
Fig. I. 9 : Machine synchrone à aimants permanents discoïde à double stator.....	9
Fig. I. 10 : Caractéristique couple/vitesse d'une MAS, [POI 03].....	11
Fig. I. 11 : SCEE basé sur MAS.....	11
Fig. I. 12 : Connexion indirecte d'une MAS sur le réseau.	12
Fig. I. 13 : MAS connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs.....	12
Fig. I. 14 : SCEE basé sur MAS à double stator.	13
Fig. I. 15 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	14
Fig. I. 16 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique, [POI 03].....	14
Fig. I. 17 : MADA, structure Kramer.....	15
Fig. I. 18 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	16
Fig. I. 19 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	17
Fig. I. 20 : SCEE avec de deux machines asynchrones en cascade.	18
Fig. I. 21 : Machines en cascade avec une carcasse unique.....	18
Fig. I. 22 : BDFRM avec rotor à cage spécial.	19
Fig. II. 1 : BDFRM avec rotor à reluctance variable, [SAR 08].	22
Fig. II. 2: Les tensions et les courants statoriques du BP.	26
Fig. II. 3 : Les tensions et les courants du stator secondaire.....	26
Fig. II. 4 : Le couple électromagnétique et la vitesse rotorique de la BDFRM.....	26
Fig. II. 5 : couple/vitesse de la BDFRM.	26
Fig. II. 6: Schéma de principe d'un CCM alimentant la BDFM.....	27
Fig. II. 7 : Représentation des bras d'un onduleur par des interrupteurs à deux positions.	29
Fig. II. 8 Schéma de principe de MLI.	31
Fig. II. 9 : Principe de la MLI sinus triangle.....	31
Fig. II. 10 : signes de commande de l'onduleur.....	31
Fig. II. 11 : Tensions composées de l'onduleur.....	31
Fig. II. 12: Tensions simples de l'onduleur.....	31
Fig. II. 13 : Connexion du CCR au réseau électrique.....	32
Fig. III. 1: Schéma global du système étudié.	34
Fig. III. 2: Schémas du contrôle de la BDFRM.	35
Fig. III. 3 : Position du référentiel par rapport au flux.....	36
Fig. III. 4 : Schéma bloc de la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas).	39
Fig. III. 5 : Système régulé par un PI.	40
Fig. III. 6: Puissance active statorique du bobinage primaire.	41
Fig. III. 7: Courant statorique du bobinage secondaire selon les axes d-q.	41
Fig. III. 8: Puissance réactive statorique du bobinage primaire.	42
Fig. III. 9: Flux statorique du bobinage primaire selon l'axe d et q.	42

Tab. II. 1: Modes de fonctionnement.23

Introduction Générale

Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire de puissance électrique pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes [WIK 09].

Le système de conversion éolien est composé d'un minimum d'éléments capables d'optimiser le transfert de l'énergie présente dans le vent. Idéalement, il ne faut qu'une turbine, un axe de transmission, une génératrice électrique tournante et un convertisseur électronique unidirectionnel ou bidirectionnel. Si la vitesse optimale des turbines se situe aux alentours de quelques dizaines de tours par minute, on ajoute un multiplicateur entre la turbine et la génératrice [POZ 03].

Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché.

La première catégorie a été retenue par la plupart (presque tous) des fabricants d'éoliennes. Elle est, actuellement, la seule approche commerciale compétitive sur le marché. L'approche de la machine multipolaire est une solution très encombrante et coûteuse, à cause principalement du fait que les aimants permanents représentent le choix technologique optimal pour cette approche. Cette dernière catégorie est l'un des axes de recherche de certains fabricants, mais il n'y a pas d'implantation significative [POZ 03].

La deuxième catégorie c'est la machine asynchrone à cage (MAS). En utilisant des techniques de la commande vectorielle et un convertisseur bidirectionnel, on assure la génération à la fréquence et tension du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor. Le problème principal de cette configuration c'est que le dimensionnement du convertisseur doit être de la même puissance que celle de la génératrice. En même temps la distorsion harmonique générée par le convertisseur oblige d'introduire un système de filtrage de la même puissance. L'avantage principal de cette technique de conversion réside dans une plage de vitesses de rotor très large [POZ 03].

La troisième solution est représentée par ce qu'on appelle la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette topologie est, actuellement, le meilleur choix des fabricants. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor; autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor [POZ 03].

Par contre, l'adoption d'un rotor bobiné limite la capacité de surcharge et introduit des modes d'oscillation supplémentaires par rapport au rotor à cage, plus rigide dans sa construction. Pour une puissance nominale donnée, la machine à rotor bobiné sera plus encombrante et plus lourde que l'équivalent à cage. Pour finir, la présence des balais oblige à des interventions de maintenance fréquentes [POZ 03].

La quatrième solution est représentée par ce qu'on appelle la machine asynchrone à double alimentation sans balais à reluctance variable (BDFRM) [ADE 15]. Celui-ci fera l'objet de notre travail. Elle est constituée par un rotor à reluctance variable et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator. Un des bobinages du stator, appelé bobinage primaire, est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé

bobinage secondaire, est alimenté par un convertisseur bidirectionnel. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage secondaire ce qui permet de générer dans le bobinage primaire une tension à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [ADE 15].

Les avantages principaux de cette structure sont :

- Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA).
- Machine robuste avec une capacité de surcharge importante et une facilité d'installation dans des environnements hostiles (avantage équivalent à celui de la MAS).
- Coûts d'installation et de maintenance réduits par rapport à la topologie MADA.
- Élimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

Le présent travail est structuré en cinq chapitres:

Dans le premier chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Ainsi que les différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

Le second chapitre est composé de deux parties :

Une première partie est consacrée à la modélisation de la BDFRM et on terminera cette partie par une simulation de cette configuration en fonctionnement génératrice.

Dans la deuxième partie nous présenterons la modélisation de l'onduleur qui alimentera le bobinage secondaire de la machine.

Dans le troisième chapitre, on a introduit la commande vectorielle par orientation du flux statorique qui présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la BDFRM en fonctionnement génératrice.

Le travail est clôturé par une conclusion générale et par l'exposition de quelques perspectives de recherche.

Chapitre I

Etat de l'Art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne

I.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne, [MER 07]. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes, [POI 03].

Dans ce chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion d'énergies éoliennes de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.1 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel

I.1.1 Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Mais jusqu'à présent son exploitation reste difficile. L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 avant J'esus-Christ (J-C) environ, [JOU 07], [MIR 05]. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [MIR 05].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde, [MIR 05].

I.1.2 Différentes types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

I.1.2.1 Les turbines éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes les plus utilisées et sont dotées d'un système de commande où la conception oriente le rotor face au vent, [BEL 07].



Fig. I. 1 : Technologie éolienne à axe horizontale, [BEL 07].

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance et le coût, (voir la figure I.10), [BEL 07].

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées du fait de leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important, [BEL 07].

I.1.2.2 Les turbines éoliennes à axe vertical.

Elles sont les moins utilisées, à cause de leur manque de performances par rapport à celle à axe horizontal [BEL 07].



Fig. I. 2: Technologie éolienne à axe vertical, [BEL 07].

Ce type d'éolienne offre la possibilité de mettre la génératrice au sol. Mais dans ce cas, le vent frotte moins la partie inférieure de la surface des pales lorsqu'il ne souffle pas à bas niveau.

Elles n'ont pas besoin de système d'orientation des pales, car le vent peut frotter les pales dans toutes les directions.

A cause des câbles qui fixent la tour au sol, son implantation prend beaucoup de superficie ce qui est un inconvénient majeur pour les sites agricoles.

I.2.5 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présents sur la figure I.12

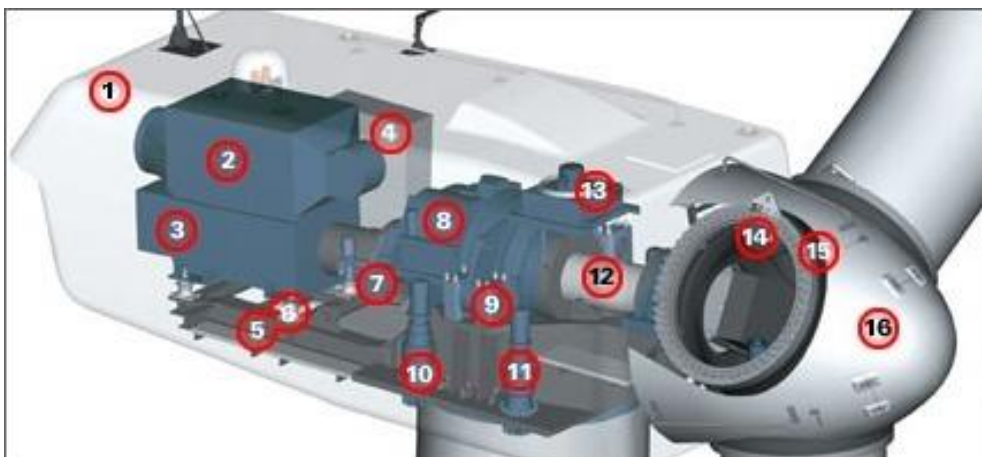


Fig. I. 3 : Exemple de système éolien, [LAV 05].

Un mat, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne, [LAV 05].

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant, la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile, [LAV 05].

La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent, [LAV 05].

I.2.6 Caractéristiques de la turbine éolienne

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure I.13 les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple, [POI 03].

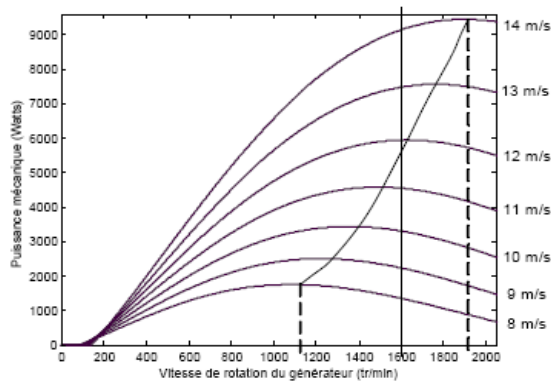


Fig. I. 4 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné, [POI 03].

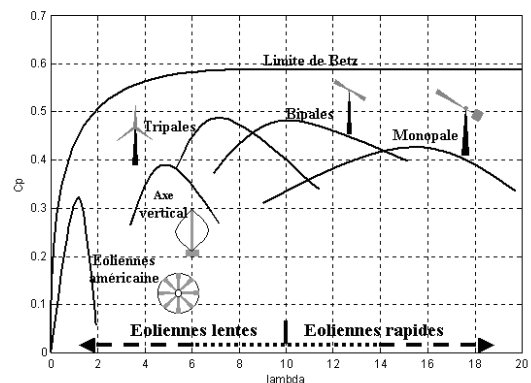


Fig. I. 5 : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs, [POI 03].

Le graphique de la figure I.14 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts, [POI 03].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s, [POI 03].

I.2.7 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

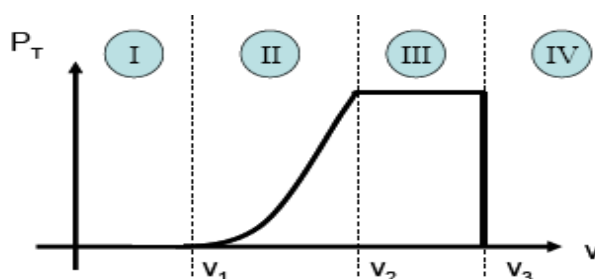


Fig. I. 6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne, [LAV 05]

V_1 – la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance ;

V_2 – la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies ;

V_3 – vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

Zone I : $V < V_1$:

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_2$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_2 < V < V_3$:

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $V > V_3$:

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

I.5 Généralités sur les machines utilisées dans le SCEE

Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.5.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants permanents ou par un bobinage d'excitation. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (voir la figure I.18), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [LOP 06], [CAM 03].

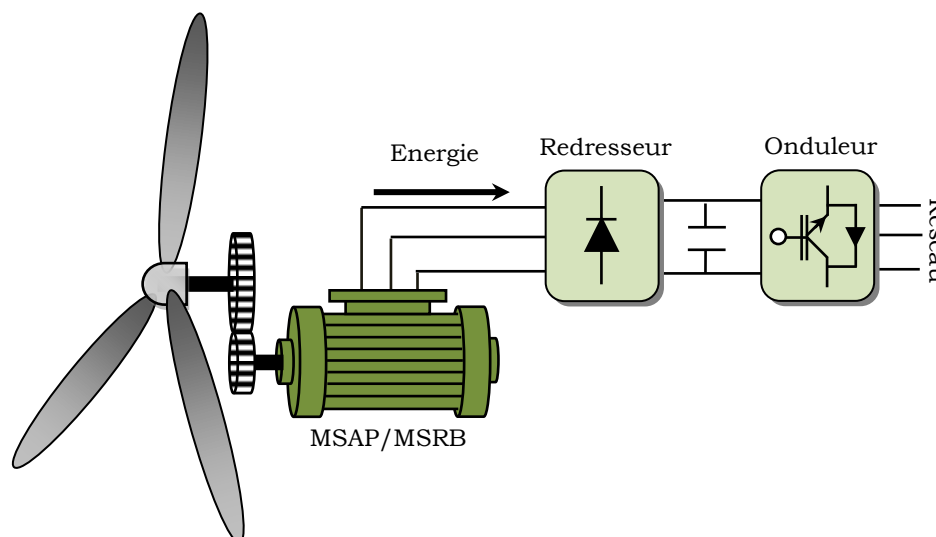


Fig. I. 7 : SGEE avec générateur synchrone.

I.5.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système. [LOP 06].

I.5.1.2 Machine synchrone à aimants permanents

La caractéristique d'auto excitation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif, [LOP 06].

I.5.1.3 Machine synchrone à aimants permanents discoïde

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques (figure I.19), soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique (figure I.20).

Un disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle, [POI 03].

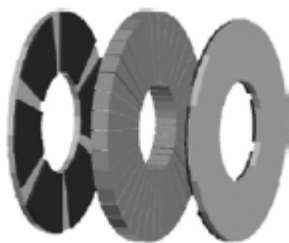


Fig. I. 8 : Machine synchrone à aimants permanents discoïde à double rotor



Fig. I. 9 : Machine synchrone à aimants permanents discoïde à double stator

I.5.2 Systèmes utilisant la machine à reluctance variable

La MRV a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator actif où sont situés les bobinages et un rotor massif. Le rotor massif distingue la MRV des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ «pulsé», [BEL 07].

La MRV est intéressante en raison de la simplicité de sa structure et de ses composants, son faible coût, sa bonne robustesse et son couple massique élevé, L'absence d'excitation au rotor qui permet de réduire les pertes. Des réalisations à grand nombre de pôles peuvent être obtenues sans difficulté et permettent la génération de puissance à faible vitesse. Les deux principaux

inconvenients de cette machine sont la complexité relative de la commande et l'ondulation du couple qui provoque un bruit important, [BEL 07].

L'application des machines à réluctance dans les systèmes éoliens est plutôt rare, cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance, des machines à réluctances excitées à denture répartie. L'excitation est le plus souvent réalisée par des aimants permanents, on parle alors de machines hybrides, [BOY 06].

Il existe plusieurs types de MRV qui sont utilisées dans l'énergie éolienne :

I.5.2.1 MRV pure :

Elle est utilisée dans l'industrie pour les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'aérospatial, [BEL 07].

Cette machine est alimentée par des courants de forme rectangulaire de pulsation ω et la vitesse de rotation est limitée au nombre de dents au rotor :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r}$$

En revanche, elle présente un régime instable en fonctionnement générateur, et une grande complexité mécanique, [BEL 07].

I.5.2.2 MRV Vernier :

Différemment à la MRV précédente, elle est alimentée par des courants sinusoïdaux, et excitée au rotor et au stator d'où on peut insérer des convertisseurs électroniques. La vitesse de rotation est inversement proportionnelle au nombre des dents du rotor, [BEL 07].

I.5.2.3 MRV hybride :

Cette machine met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet Vernier avec une alimentation sinusoïdale, [BEL 07].

Le grand nombre de dents rend cette structure intéressante pour les forts couples. Cette machine utilise des aimants à terre rare spéciaux afin d'éviter leur démagnétisation, [BEL 07].

I.5.3 Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.5.3.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines asynchrones à cage d'écureuil (MAS) équipent actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, [POI 03]. Celui-ci sont connues par leurs construction extrêmement simple, leurs robustesse, leurs sécurité de fonctionnement, l'absence de contacts glissant sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être fabriquée en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé, [BEL 07].

La caractéristique couple/vitesse d'une MAS à deux paires de pôles est donnée sur la figure I.21, [POI 03].

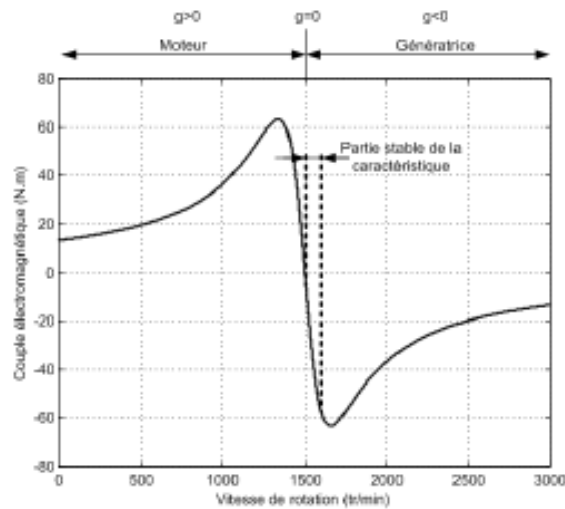


Fig. I. 10 : Caractéristique couple/vitesse d'une MAS, [POI 03].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min, [POI 03].

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe au réseau. La figure I.22 représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage, [BEL 07]. 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%). La fréquence étant imposée par le réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine, [POI 03]. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie, [BEL 07].

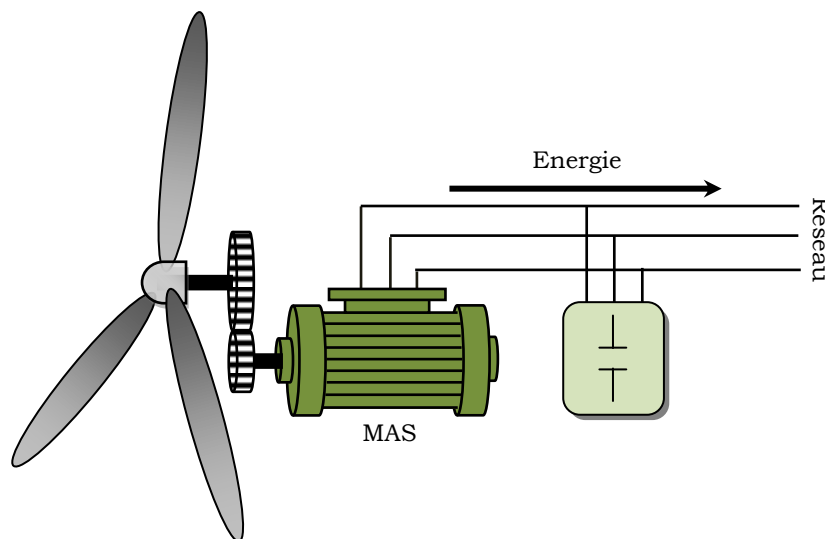


Fig. I. 11 : SCEE basé sur MAS.

Par contre, cette configuration a quelques inconvénients [POI 03] :

- le rotor n'est pas accessible pour récupérer l'énergie rotorique;

- Elle ne permet pas une vitesse variable ;
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause de la variation brusque du couple ;
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

La configuration est présentée dans la figure I.23. Elle est équipée d'une machine asynchrone à cage, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator, [BEL 07].

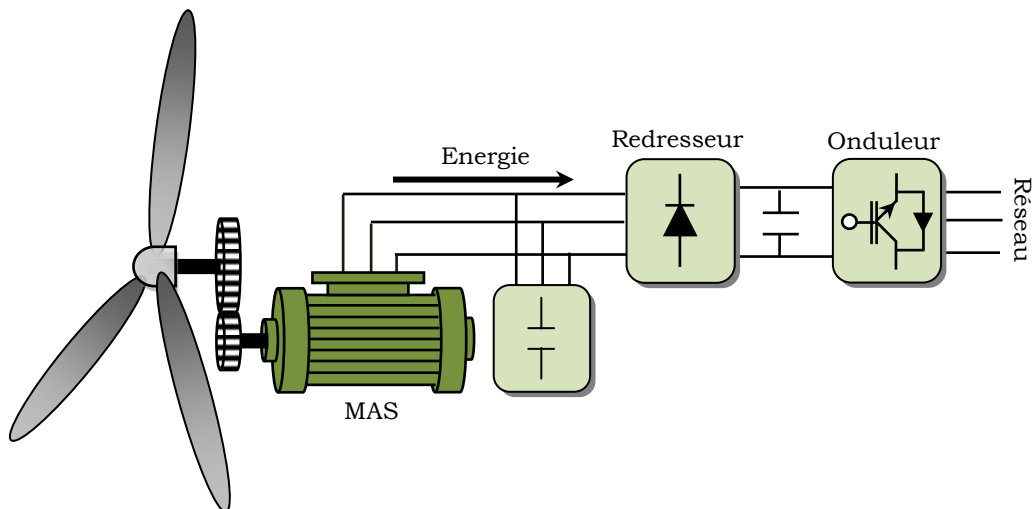


Fig. I. 12 : Connexion indirecte d'une MAS sur le réseau.

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

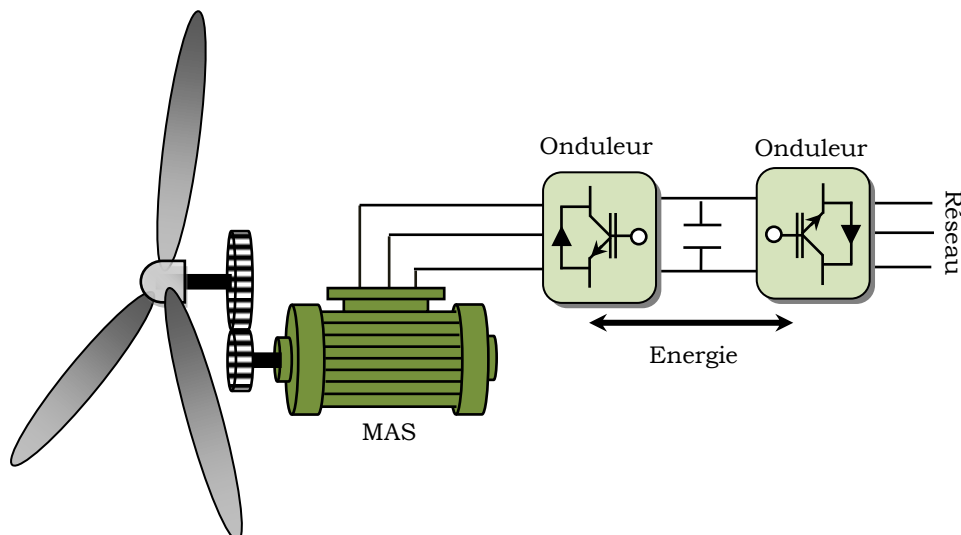


Fig. I. 13 : MAS connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (voir la figure I.24) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent.

Néanmoins, ces deux configurations ne sont pas appliquées en pratique, pour les inconvénients cités ci-dessus. En plus, la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs. [POI 03].

I.5.3.2 Machine asynchrone à double stator

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de MAS à double stator (voir la figure I.25) :

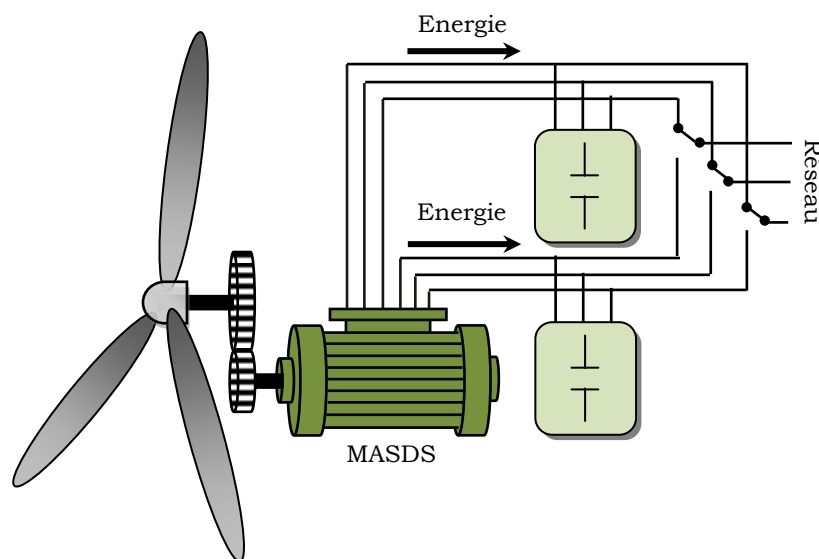


Fig. I. 14 : SCEE basé sur MAS à double stator.

Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. [POI 03], [BEL 07].

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [POI 03], [BEL 07].

I.5.3.3 MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.26, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [POI 03].

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse

de la machine asynchrone (voir la figure I.27). Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur, [POI 03].

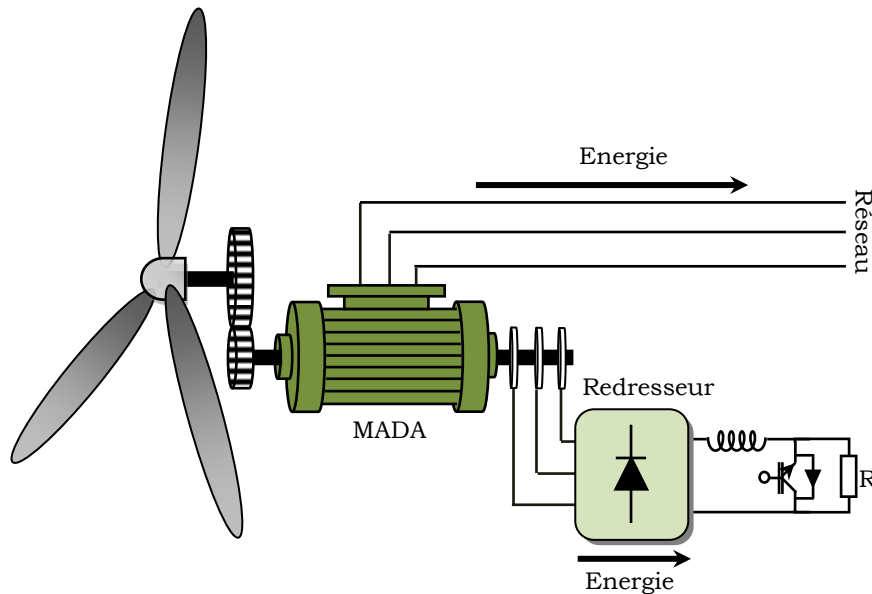


Fig. I. 15 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système, [POI 03], [MEK 04], [MER 07]. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%, [POI 03].

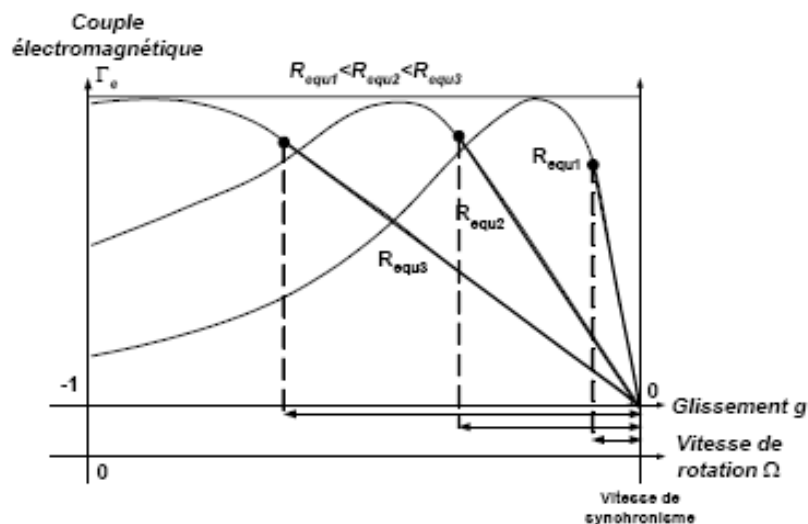


Fig. I. 16 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique, [POI 03].

Pour améliorer le rendement de ce système, on récupère la puissance perdue par effet joule au niveau de la résistance en utilisant un convertisseur qui va permettre de renvoyer la puissance récupérée vers le réseau électrique. Alors que le convertisseur est dimensionné selon la puissance

que nous avons récupérée, (soit environ 25% de la puissance nominale) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominale. C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté du réseau [MEK 04]. Puisque le convertisseur statique doit seulement traiter la puissance de glissement à faible communication, dans ce cas, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau. Deux options de convertisseur au rotor sont alors utilisées. Dans la première un convertisseur ou la méthode Scherbius réalisant les régimes hypo/hyper synchrones. Ce cas favorise le fonctionnement à couple constant. Dans la seconde option, un convertisseur à deux étages unidirectionnel est utilisé ou qui est appelé méthode Kramer ou régime hypo synchrone [MEK 04].

I.5.3.4 MADA avec structure de Kramer

Dans le but d'augmenter le rendement de la structure du système précédent, on remplacera le hacheur et la résistance par un onduleur qui va permettre de renvoyer l'énergie de glissement vers le réseau. (Voir la figure I.28), [POI 03].

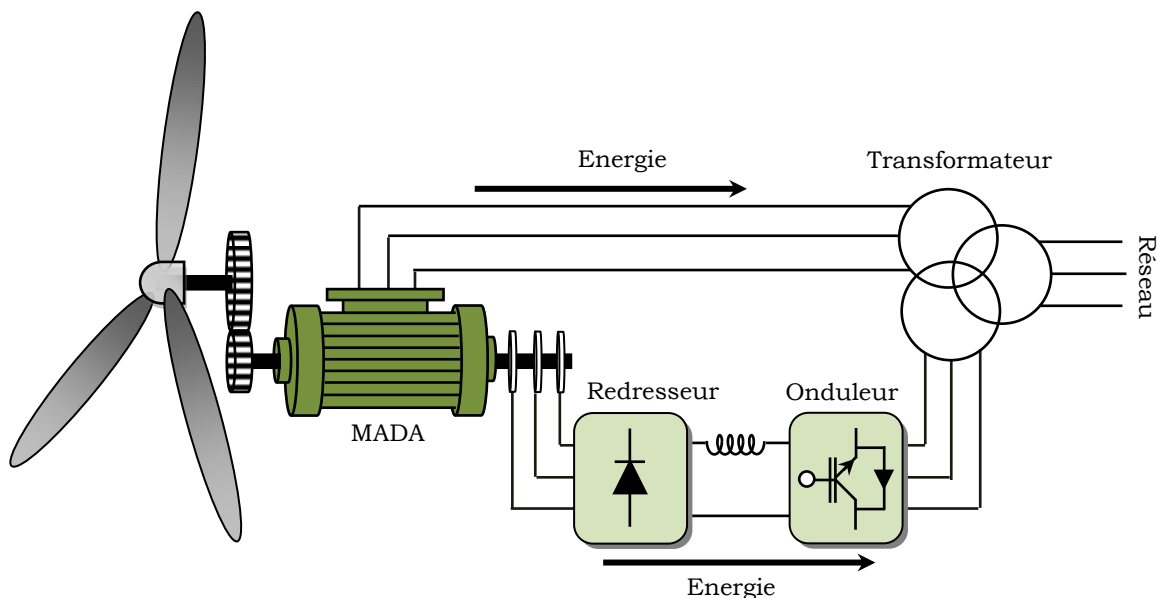


Fig. I. 17 : MADA, structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT, [POI 03].

I.5.3.5 MADA avec cycloconvertisseur

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (voir la figure I.29), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [POI 03].

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (Fonctionnement hypersynchrone).

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI, [POI 03].

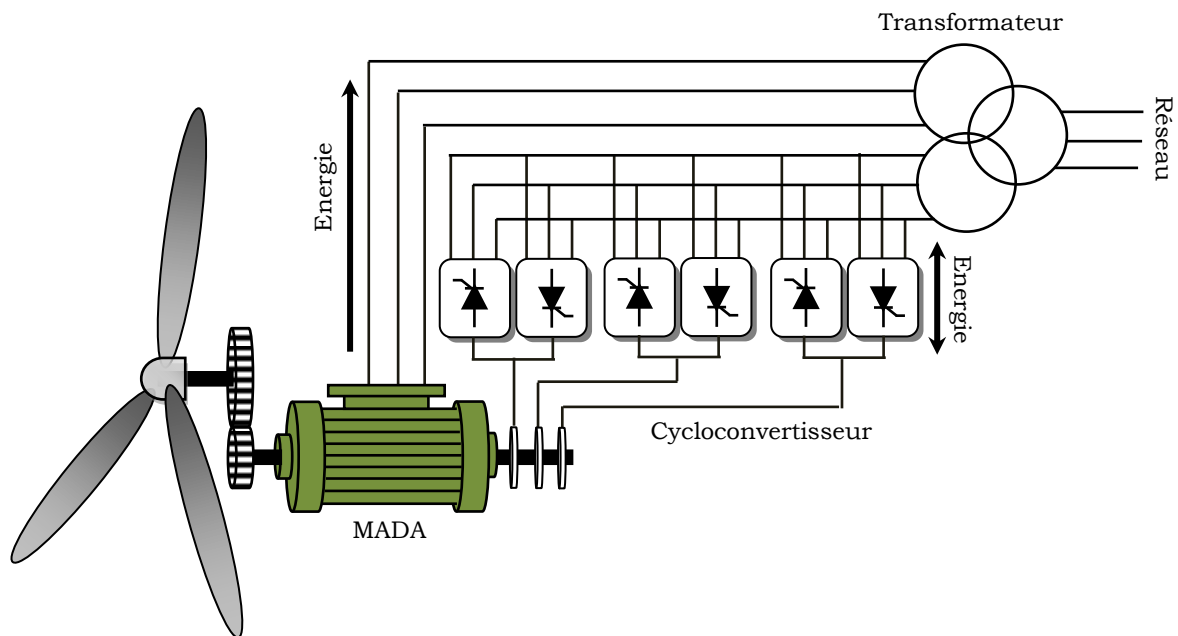


Fig. I. 18 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

I.5.3.6 MADA avec structure de Scherbius

Une autre structure intéressante (figure I.30) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO, [POI 03].

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées), [HAM 08], [POI 03].

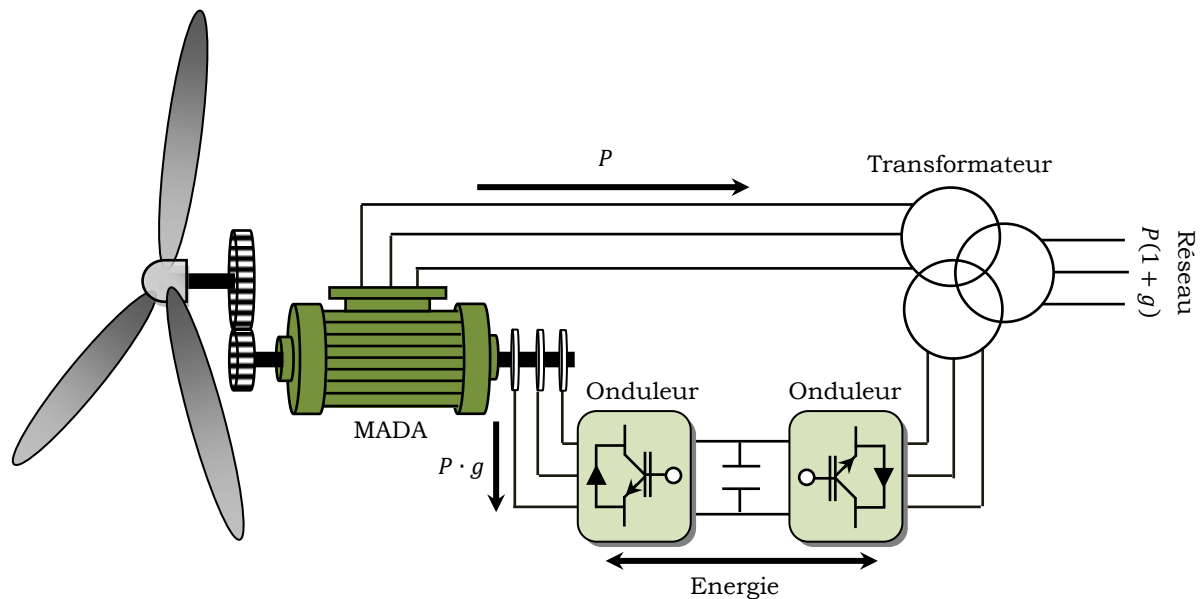


Fig. I. 19 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau, [POI 03], [HAM 08]. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle, la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau, [POI 03], [HAM 08]. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité, [HAM 08].

Cette machine est un peu plus complexe que de la machine asynchrone à cage avec laquelle elle a en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines, [MIR 05].

Le résumé des points forts de la MADA sont, [LOP 06]. :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.

I.5.3.7 MADA en cascade

Les travaux de recherche [KAT 01], [PAT 05], [PAT 06], [PAT 09], [ADA 07], [ADA 08], [ADA 09], [HOP 99], [HOP 00], [HOP 01], [ORT 84], [BOA 01], [JAL 09], [PRO 09], [SON 01], [CHI 01], [LI 01], [WAL 90], [SMI 66], [BAS 03], ont été effectués sur le couplage de deux MADA.

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la MAS et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais [HOP-01]. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (voir la figure I.31). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/BC est proportionnelle au glissement. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le BC, ce qui permet de générer dans le BP une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique, [POZ 03], [KHO 06], [VID 04], [AMI 08].

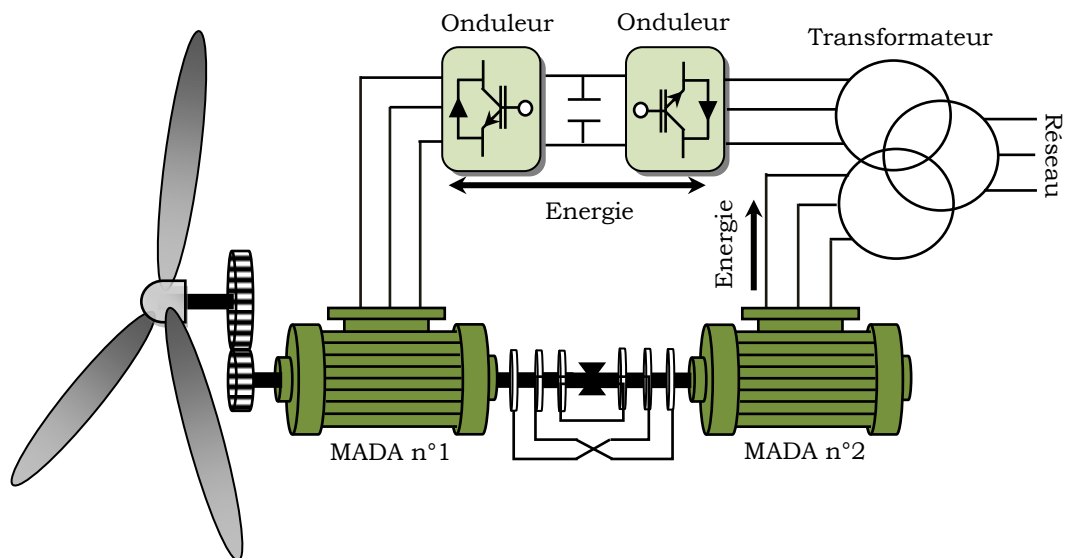


Fig. I. 20 : SCEE avec de deux machines asynchrones en cascade.

En partant du concept initial, on peut essayer d'optimiser des aspects telles que l'encombrement, la robustesse, etc. Les deux stators peuvent être inclus dans la même carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage (voir la figure I.32) [HOP 01], [POZ 03]. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [VID 04].

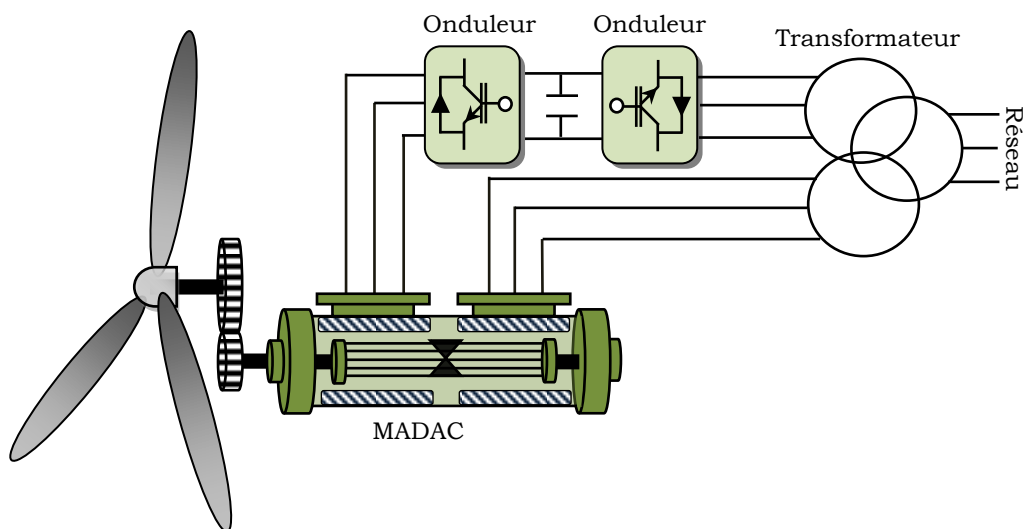


Fig. I. 21 : Machines en cascade avec une carcasse unique.

I.5.3.8 MADA sans balais (BDFRM)

La cascade est une association de deux MADA que nous considérons comme distinctes (i.e. indépendantes). Afin d'optimiser et d'éviter l'encombrement de celui-ci. On place les enroulements des deux MADA dans des encoches communes : on parle alors en langue anglaise de BDFRM (Brushless Doubly Fed Reluctance Machine) [ADE 15]. Dans une telle machine, des couplages magnétiques entre bobinages sont inévitables et il y a des précautions à prendre dans la conception pour les rendre nuls, en théorie, ou tout du moins aussi faibles que possibles en pratique. Le point essentiel porte sur les nombres de paires de pôles des deux bobinages. Afin d'obtenir deux bobinages découplés magnétiquement, il faut que le flux créé par le stator de l'une ait une résultante nulle sur le stator de l'autre. Il est aisé de découpler deux bobinages en les plaçant en quadrature. Ou, ici nous devons découpler des enroulements triphasés entre eux et il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir un découplage par un simple décalage angulaire. On proposera plutôt un découplage par un choix judicieux des nombres de paires de pôles des deux bobinages, comme cela est illustré par le schéma de la figure I.33. On notera que le cage d'écureille peut être reconstruit sous la forme d'une cage spéciale (voir la figure I.34) d'après [MIC 95]. La construction du rotor est faite d'une façon à respecter le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages statoriques. [ADE 15].

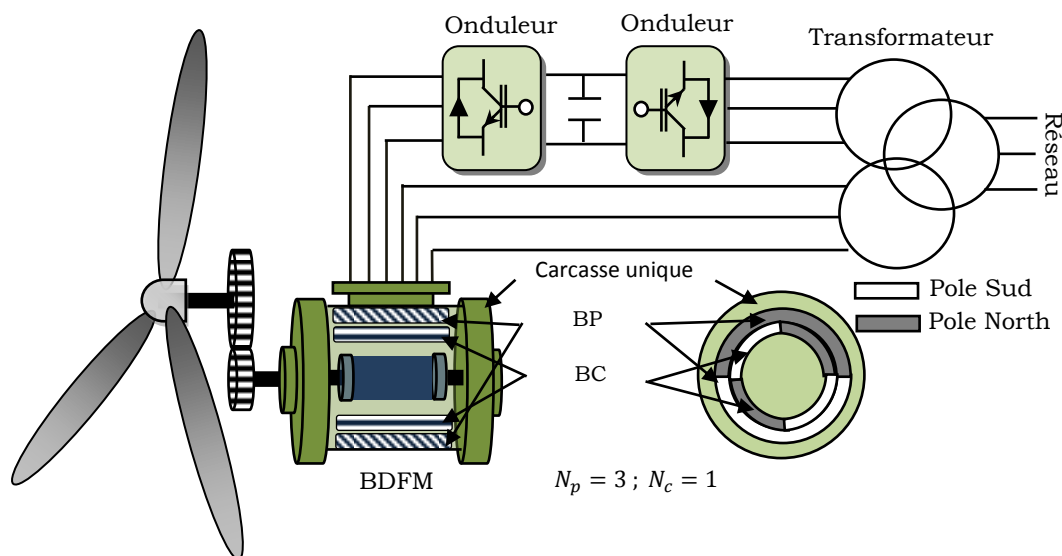


Fig. I. 22 : BDFRM avec rotor à reluctance variable.

Les avantages potentiels de la BDFM sont :

- Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA) ;
- Machine robuste avec une capacité de surcharge grande ;
- Facilité d'installation dans des environnements hostiles (avantage équivalent à celui de la MAS) ;
- Coûts d'installation et de maintenance réduit par rapport à la topologie MADA.
- Élimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

I.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Trois grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.

Le dispositif basé sur la BDFRM regroupant les avantages de la MAS et de la MADA présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Le prochain chapitre, sera consacré à la modélisation et simulation de SCEE sous MATLAB.

Chapitre II

Modélisation et Simulation de la BDFRM

II.1 Introduction

Ce chapitre est composé de trois parties :

Une première partie est consacrée à la modélisation et à la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées. Par la suite on calculera la puissance maximale pouvant être extraite à l'aide de la limite de Betz. Et enfin, en terminera la première partie par des résultats de simulation pour vérifier les modèles du système à étudier.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la BDFRM. Elle sera clôturée par une simulation de cette machine en fonctionnement génératrice.

Dans la troisième et dernière partie nous présenterons la modélisation du convertisseur AC-DC-AC qui alimentera la BDFM via le bobinage de commande.

II.4 Principe de fonctionnement et Modélisation de la BDFRM

Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps la topologie de la machine et son principe de fonctionnement et on décrira les différents modes de fonctionnement. Ensuite, nous présenterons le modèle dynamique de la machine dans le repère du Park, Enfin, nous présenterons les simulations de celui-ci en fonctionnement génératrice.

II.4.1 Topologie de la BDFRM

Une configuration typique d'une BDFRM est schématisée à la figure II.18.

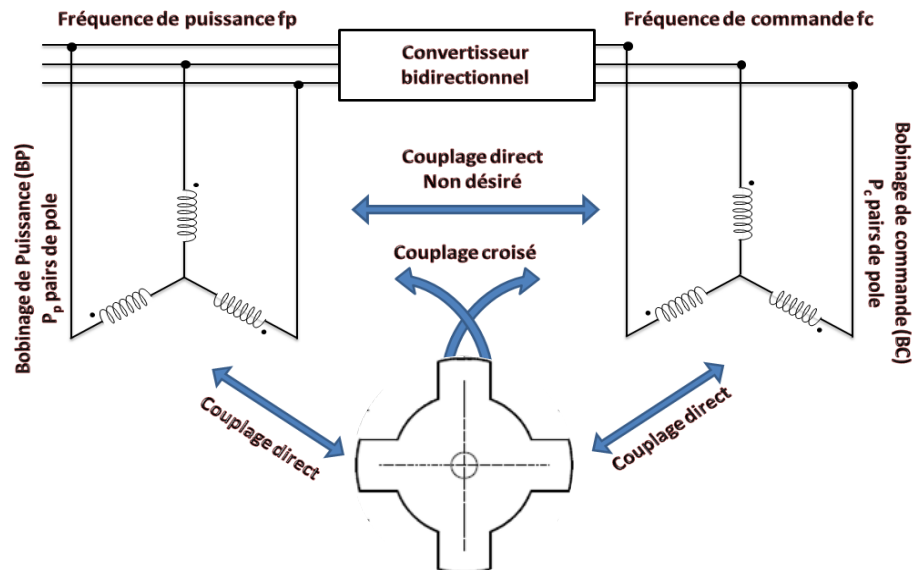


Fig. II. 1 : BDFRM avec rotor à reluctance variable.

La BDFRM comprend deux bobinages triphasés dans le stator appelés : Bobinage de Puissance (BP) et Bobinage de Commande (BC) et un rotor à cage spécial [ADE 15]. A l'aide de l'ensemble convertisseur-BC on peut maîtriser le courant statorique de BP, et ainsi, on peut le faire fonctionner à fréquence et amplitude constante même si la vitesse du rotor est loin du synchronisme. [ADE 15].

Dans une telle machine, des couplages magnétiques entre bobinages (BP-BC) sont théoriquement nuls. Afin d'obtenir deux bobinages découplés magnétiquement, il faut que le flux créé par le bobinage statorique de l'une ait une résultante nulle sur le bobinage statorique de l'autre. Il est aisé de découpler deux bobinages en les plaçant en quadrature. Or, ici nous devons découpler des bobinages triphasés entre eux et il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir un découplage par un simple décalage angulaire. On proposera plutôt un découplage par un choix judicieux des nombres de paires de pôles des deux bobinages.

II.4.2 Modes de fonctionnement de la BDFRM

La machine nous permet de fonctionner en différents modes, à la fois le mode asynchrone et le mode synchrone. Le mode de fonctionnement synchrone est la plus intéressante pour les

applications de production d'énergie à vitesse variable. Dans le tableau ci-dessous, [SAR 08], Nous pouvons voir toutes les combinaisons possibles des deux bobinages statorique.

Mode	Bobinage de puissance	Bobinage de commande
1. Asynchrone	Fréquence réseau	circuit ouvert
2. Asynchrone	Fréquence réseau	Court circuit
3. Asynchrone	Fréquence réseau	Fréquence variable
4. Synchrone	Fréquence réseau	Fréquence variable

Tab. II. 1: Modes de fonctionnement.

II.4.2.1 Modes Asynchrone

Dans le cas 1, le bobinage de puissance crée un champ tournant de vitesse $\Omega_p = 2\pi f_p / P_p$. On désigne par P_p le nombre de paires de pôles de BP, dans ce cas, la vitesse du rotor sera différentes de la vitesse de synchronisme (Asynchronisme). L'application de la loi de Faraday aux enroulements rotoriques montre que ceux-ci deviennent le siège d'un système de forces électromotrices triphasées engendrant elles mêmes des courants rotoriques, ce qui va générer une tension dans le Bobinage de Commande (couplage croisé). Cependant, le BC en circuit ouvert, aucun courant ne sera généré dans celui-ci, la machine fonctionnera comme un moteur asynchrone avec une seule alimentation. Ce mode de fonctionnement peut être intéressant pour la synchronisation ou pour les cas de pannes d'alimentation.

Dans le cas 2, la seule source de tension générée dans le BC est à travers le couplage croisé BP-BC, dont la fréquence est toujours $\omega_c = -(\omega_p - (P_p + P_c)\omega_r)$. L'opération dans ce cas s'élève à une machine asynchrone à $P_p + P_c$ paires de pôles. la vitesse du rotor de la BDFM dépend de la fréquence de BC, et ce dernier varie suivant la charge.

Dans le cas 3, les deux bobinages (BP et BC) créent deux champs distincts qui tournent à des vitesses $\Omega_p = 2\pi f_p / P_p$ et $\Omega_c = 2\pi f_c / P_c$ respectivement. Chacun des champs induit dans le rotor un système de forces électromotrices de fréquences f_{rp} et f_{rc} respectivement et fait circuler en simultanément dans les deux systèmes des courants rotoriques de fréquence f_{rp} et f_{rc} . Ces courants induisent ensuite dans le stator un système de forces électromotrices de fréquence différente de la fréquence de l'alimentation principale, ce qui fait induire des courants harmoniques fréquentielles. Ce mode de fonctionnement est insuffisant en régime permanent, et ne sera admissible que lors de la synchronisation des fréquences.

II.4.2.2 Mode synchrone

La BDFM fonctionne en mode synchrone lorsque les champs créés par les deux bobinages statorique au rotor tournant à la même vitesse. Dans ces conditions, les courants rotoriques induits ont la même fréquence $f_{rp} = f_{rc}$, dans ce cas, les deux courants rotoriques vont

créer un seul champ dans le rotor. Ce champ rotorique sert le couplage entre les deux bobinages statorique.

II.4.5 Modèle dynamique de la BDFRM

Pour commander la BDFM, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement [ADE 15], à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental.

La BDFRM est composée de deux bobinages statoriques et un rotor spécial. La caractéristique principale de la BDFRM c'est que le Bobinage de Commande peut modifier le courant rotorique qui a été induit par le Bobinage de Puissance. Ce résultat est obtenu par l'effet de couplage croisé électromagnétique entre les deux bobinages statoriques par l'intermédiaire du rotor. L'existence de plusieurs références (deux bobinages statoriques plus le rotor), il est difficile de mettre en œuvre des stratégies de contrôle conventionnel utilisé dans les machines à induction.

Dans [ADE 15] un modèle dynamique unifié de la BDFRM de référence d-q a été développé. Son étude est basée sur la théorie développée dans. Le modèle est obtenu en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- Les bobinages statoriques ont une distribution sinusoïdale avec nombres de pôles différents;
- La symétrie de construction est parfaite.
- Les nids rotorique sont symétriques et chaque nid est composé de plusieurs boucles isolées, il est considéré comme une seule boucle pour chaque nid.

Le modèle dynamique unifiée référé au bobinage de puissance développé dans [ADE 15] est:

Equations électriques :

$$\begin{aligned}
 v_{pd} &= R_p i_{pd} + \dot{\lambda}_{pd} - \omega_p \lambda_{pq} \\
 v_{pq} &= R_p i_{pq} + \dot{\lambda}_{pq} + \omega_p \lambda_{pd} \\
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + \dot{\lambda}_{sd} - (\omega_r - \omega_p) \lambda_{sq} \\
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \dot{\lambda}_{sq} + (\omega_r - \omega_p) \lambda_{sd}
 \end{aligned}
 \tag{II.50}$$

Equations du flux :

$$\begin{aligned}
\lambda_{pd} &= L_p i_{pd} + L_m i_{sd} \\
\lambda_{pq} &= L_p i_{pq} - L_m i_{sq} \\
\lambda_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{pd} \\
\lambda_{sq} &= L_s i_{sq} - L_m i_{pq}
\end{aligned}
\tag{II.51}$$

L'équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_p} p_r (\lambda_{pd} i_{sq} + \lambda_{pq} i_{sd}) \tag{II.52}$$

L'équation mécanique de la BDFRM :

$$J_g \frac{d\omega_m}{dt} + f_g \omega_m = C_{em} - C_{ch} \tag{II.53}$$

Les puissances actives et réactives :

Pour le bobinage de puissance :

$$\begin{aligned}
P_p &= \frac{3}{2} (v_p^q i_p^q + v_p^d i_p^d) \\
Q_p &= \frac{3}{2} (v_p^q i_p^d - v_p^d i_p^q)
\end{aligned}
\tag{II.54}$$

Pour le bobinage de commande :

$$\begin{aligned}
P_s &= \frac{3}{2} (v_s^q i_s^q + v_s^d i_s^d) \\
Q_s &= \frac{3}{2} (v_s^q i_s^d - v_s^d i_s^q)
\end{aligned}
\tag{II.55}$$

La puissance totale de la BDFRM :

$$\begin{aligned}
P_T &= P_p + P_s \\
Q_T &= Q_p + Q_s
\end{aligned}
\tag{II.56}$$

II.4.6 Résultats de simulation

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la BDFRM en fonctionnement générateur, avec trois modes de couplage du BC : en court circuit et en circuit ouvert. Son modèle lié au champ tournant de la BP. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux d'une BDFM de puissance 1.5 KW. La BDFRM est entraînée à une vitesse fixe égale à 700 tr/min, alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite au niveau du BP avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 311 V.

BC en court circuit :

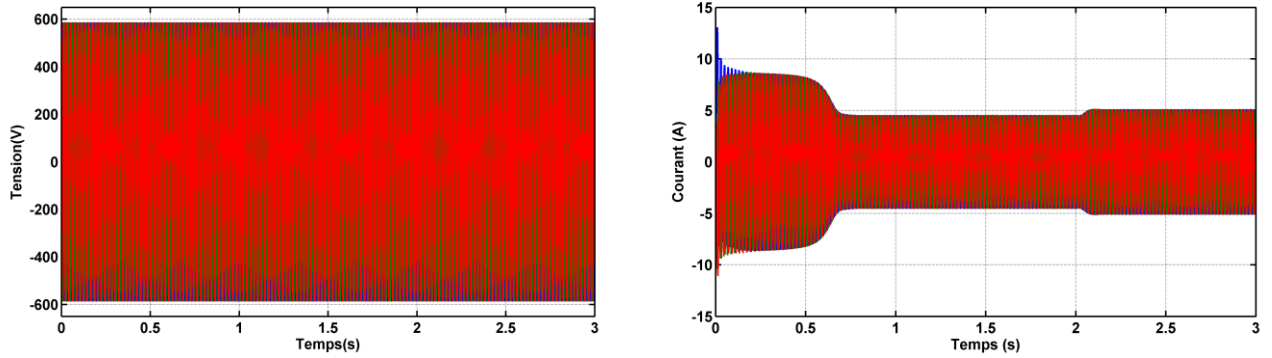


Fig. II. 2: Les tensions et les courants statoriques du BP.

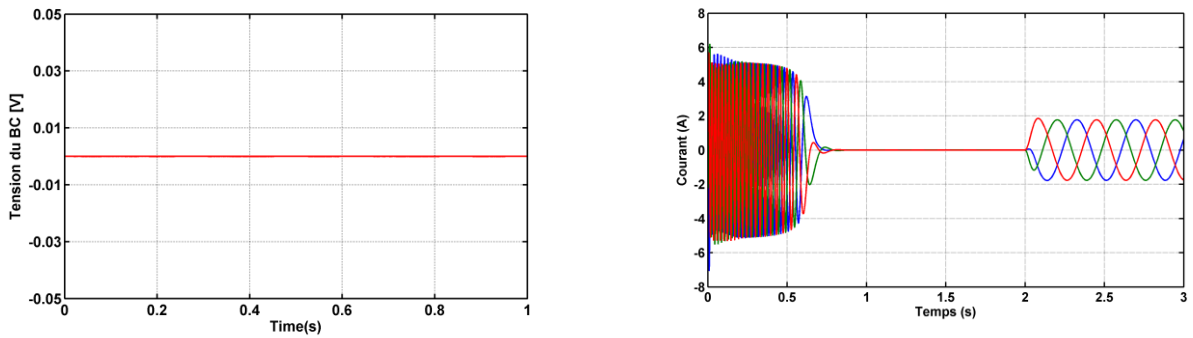


Fig. II. 3 : Les tensions et les courants du stator secondaire.

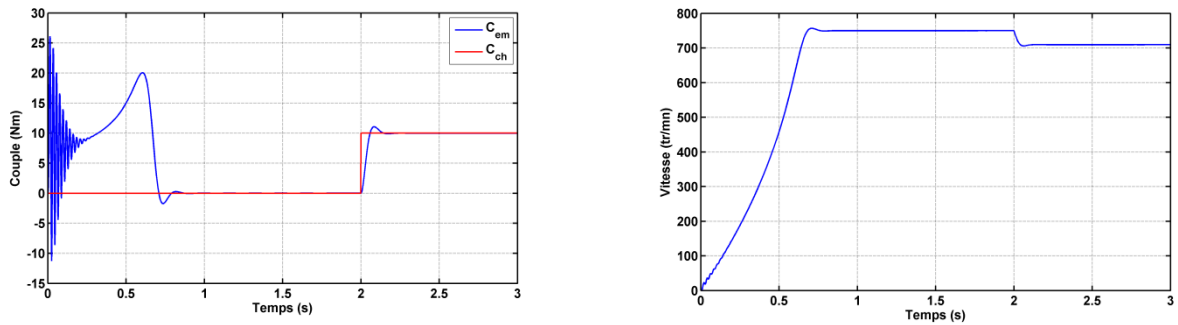


Fig. II. 4 : Le couple électromagnétique et la vitesse rotorique de la BDFRM.

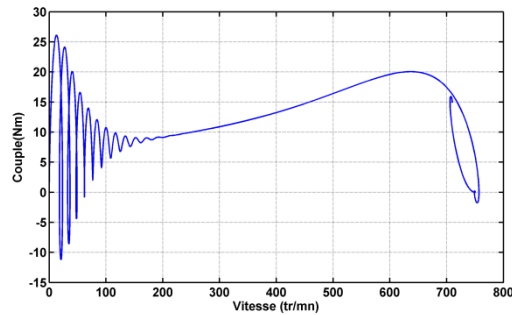


Fig. II. 5 : couple/vitesse de la BDFRM.

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique du moteur atteint au démarrage une valeur maximale de 26 Nm lorsque le secondaire est en court circuit. On constate ainsi l'importance des courants statoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 0,05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques.

II.5 Modélisation des convertisseurs

II.5.1 Convertisseurs côté machine

Pour un fonctionnement hyposynchrone de la BDFRM, le convertisseur côté machine il fonctionnera comme un onduleur. Sa commande est réalisée par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Le convertisseur côté machine (CCM) est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la BDFM des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [ELB 09]. La figure II.35 représente le schéma de principe d'un CCM triphasé qui alimente la machine.

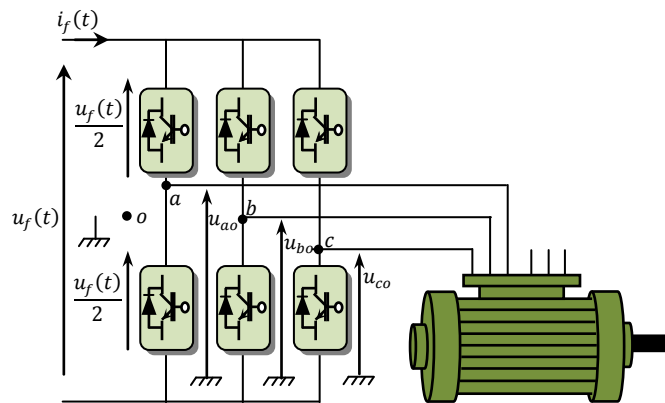


Fig. II. 6: Schéma de principe d'un CCM alimentant la BDFM.

La commande des deux transistors du même bras doit être complémentaire pour assurer la continuité des courants de sortie et éviter le court circuit de la source [ELB 09].

- Tensions des phases statoriques :

On peut définir les tensions des phases a, b, c par rapport au point milieu o de la source comme suit :

Pour la tension de la phase a :

$$\begin{aligned}
 u_{ao} &= \frac{u_f(t)}{2} && \text{Si } T_1 \text{ est fermé ;} \\
 u_{ao} &= \frac{-u_f(t)}{2} && \text{Si } T_4 \text{ est fermé ;} \\
 u_{ao} &= 0 && \text{Si } T_1 \text{ et } T_4 \text{ sont ouverts;}
 \end{aligned}$$

Pour la tension de la phase b :

$$\begin{aligned}
 u_{bo} &= \frac{u_f(t)}{2} && \text{Si } T_2 \text{ est fermé ;} \\
 u_{bo} &= \frac{-u_f(t)}{2} && \text{Si } T_5 \text{ est fermé ;} \\
 u_{bo} &= 0 && \text{Si } T_2 \text{ et } T_5 \text{ sont ouverts;}
 \end{aligned}$$

Pour la tension de la phase c :

$$\begin{aligned} u_{co} &= \frac{u_f(t)}{2} && \text{Si } T_3 \text{ est fermé ;} \\ u_{co} &= \frac{-u_f(t)}{2} && \text{Si } T_6 \text{ est fermé ;} \\ u_{co} &= 0 && \text{Si } T_3 \text{ et } T_6 \text{ sont ouverts;} \end{aligned}$$

- Tensions composées produites par CCM :

On peut déduire les tensions composées en utilisant les tensions de phase précédentes exprimées par rapport au point milieu :

$$\begin{aligned} u_{ab} &= u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} &= u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} &= u_{co} - u_{ao} \end{aligned}$$

- Tensions simples produites par CCM :

Soit n le point neutre du côté de la machine, alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} u_{ao} &= u_{an} - u_{no} \\ u_{bo} &= u_{bn} - u_{no} \\ u_{co} &= u_{cn} - u_{no} \end{aligned}$$

Et comme le système est supposé en équilibre, c'est-à-dire :

$$i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \text{ et } u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (\text{II.57})$$

Alors :

$$u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (\text{II.58})$$

On obtient finalement les expressions des tensions simples de la machine :

$$\begin{aligned} u_a = u_{an} &= u_{ao} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{ao} - u_{bo} - u_{co}) \\ u_b = u_{bn} &= u_{bo} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{bo} - u_{ao} - u_{co}) \\ u_c = u_{cn} &= u_{co} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{co} - u_{ao} - u_{bo}) \end{aligned} \quad (\text{II.59})$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ao} \\ u_{bo} \\ u_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

Dans le cas de la commande complémentaire, on peut remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions, comme le montre la figure II.36.

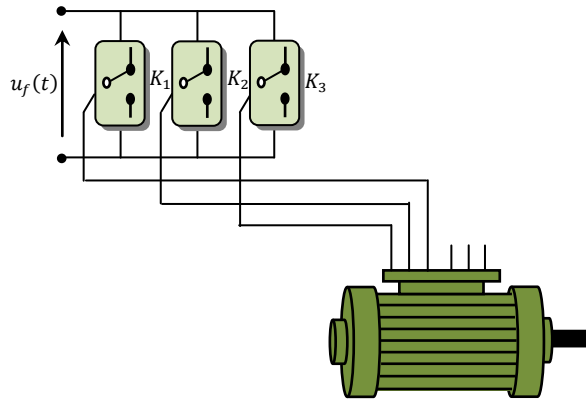


Fig. II. 7 : Représentation des bras d'un onduleur par des interrupteurs à deux positions.

A chacun des interrupteurs $K_i (i = 1,2,3)$, on associe une fonction logique f_i définie par :

$f_i = +1$ si K_i est connecté à la borne (+) de la source ;

$f_i = -1$ si K_i est connecté à la borne (-) de la source.

Il en découle que les tensions statoriques simples s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{u_f}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

La détermination des fonctions f_i dépend de la stratégie de commande. La plus utilisée reste la Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI).

II.5.1.1 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions à partir d'une source de tension continue. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [ELB 09]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur [ELB 09].

La figure II.35 représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente le BC de la BDFRM.

En contrôlant les états des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur, on fixe les valeurs des tensions de sortie de l'onduleur $u_{ao}, u_{bo},$ et u_{co} à $+0.5 u_f$ ou à $-0.5 u_f$, où $U_{dc} = 500V$

L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions u_{ao}, u_{bo}, u_{co} sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont

déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a , f_b et f_c qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux, l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs [ELB 09].

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales, on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas ci d'une modulation sinus triangle [ELB 09].

Généralement le récepteur est connecté en étoile à neutre isolé. Dans ce cas, les tensions vues par les phases du récepteur ne sont pas directement égales à celles fournies à la sortie de l'onduleur et se déduisent de celles-ci par la relation suivante, si on admet que la somme des tensions aux bornes des phases du récepteur est nulle :

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} u_{ao}(t) \\ u_{bo}(t) \\ u_{co}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Où la matrice S est donnée par :

$$S = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.63})$$

Cette relation est valable tant au niveau des valeurs instantanées des tensions que de leurs valeurs moyennes sur une période MLI. Il suffit de prendre comme valeurs de référence pour u_{ao} , u_{bo} , u_{co} les valeurs de référence souhaitées pour u_a , u_b , u_c pour que ces tensions suivent en moyenne leurs références sur chaque période MLI [ELB 09].

On définit :

- L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence du modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_o} \quad (\text{II.64})$$

- L'indice d'amplitude r égal au rapport de l'amplitude de référence sur l'amplitude de la porteuse.

$$r = \frac{V_p}{V_o} \quad (\text{II.65})$$

- La valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur vaut exactement :

$$V_{max} = r \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.66})$$

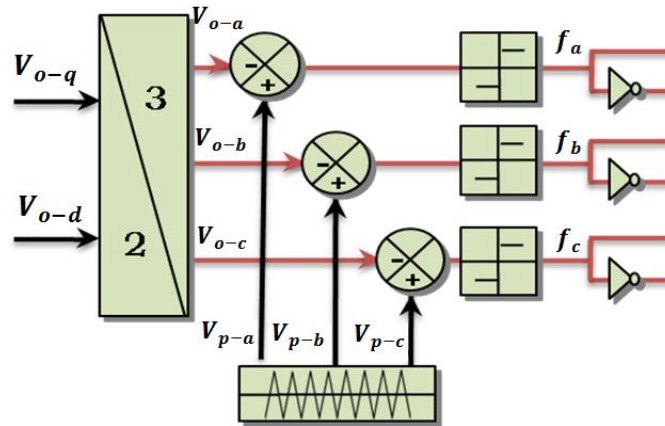


Fig. II. 8 Schéma de principe de MLI.

II.5.1.2 Résultats de simulation

Pour cette stratégie de commande, on visualise les tensions de phase u_a, u_b, u_c et son spectre d'harmoniques ainsi que les tensions entre phases, pour une fréquence $f = 50 \text{ Hz}$ et un rapport d'amplitude $r = 0.9$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes.

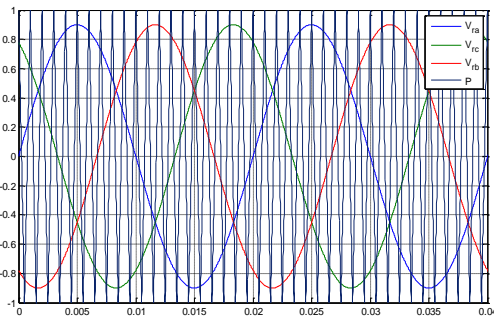


Fig. II. 9 : Principe de la MLI sinus triangle

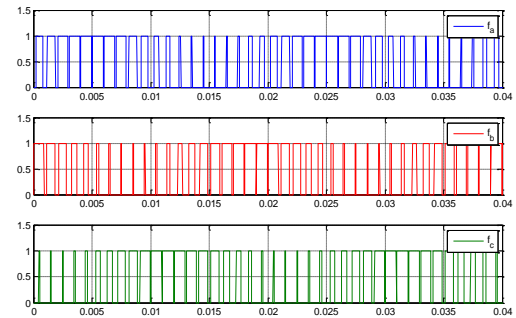


Fig. II. 10 : signes de commande de l'onduleur

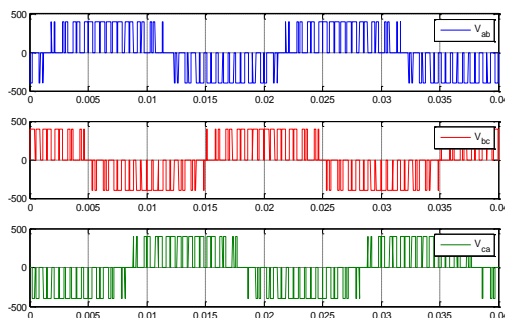


Fig. II. 11 : Tensions composées de l'onduleur

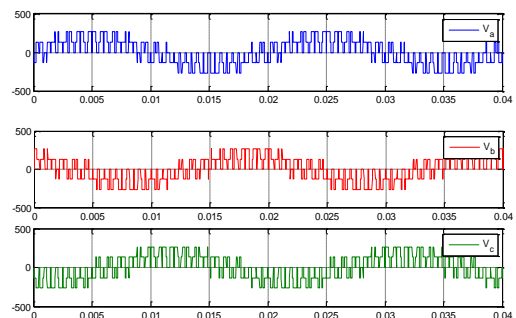


Fig. II. 12: Tensions simples de l'onduleur

II.5.2 convertisseur côté réseau

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur côté réseau (CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La figure II.42 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée [GAI 10] [PRO 09].

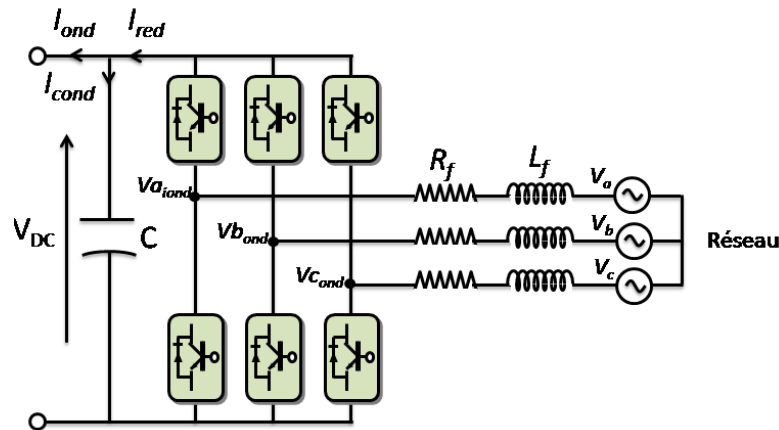


Fig. II. 13 : Connexion du CCR au réseau électrique.

Dans ces parties, nous avons développé les modèles de la turbine, de la BDFM et de la connexion du CCR avec le réseau électrique. Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser au dispositif de commande du système éolien.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles de système de conversion éolienne. La première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la BDFM. Dans la deuxième partie, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais en fonctionnement génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, où la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la BDFRM est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle [POZ 03]. Des résultats de simulation sont présentés.

Dans la dernière partie nous avons présenté le modèle du convertisseur AC-DC-AC, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande vectorielle de la BDFM afin d'optimiser la puissance délivrée au réseau électrique.

Chapitre III

Commande Vectorielle de la BDFRM

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons introduire la commande vectorielle par orientation du flux qui présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machines asynchrones double alimentées sans balais aussi bien en fonctionnement génératrice que moteur.

Dans cette optique, nous allons proposer une loi de commande pour la BDFRM basée sur l'orientation du flux statorique du bobinage de puissance, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques du bobinage de puissance et les grandeurs du bobinage de commande. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux du bobinage de commande en vue de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le bobinage de puissance et le réseau.

III.1. Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure III.1.

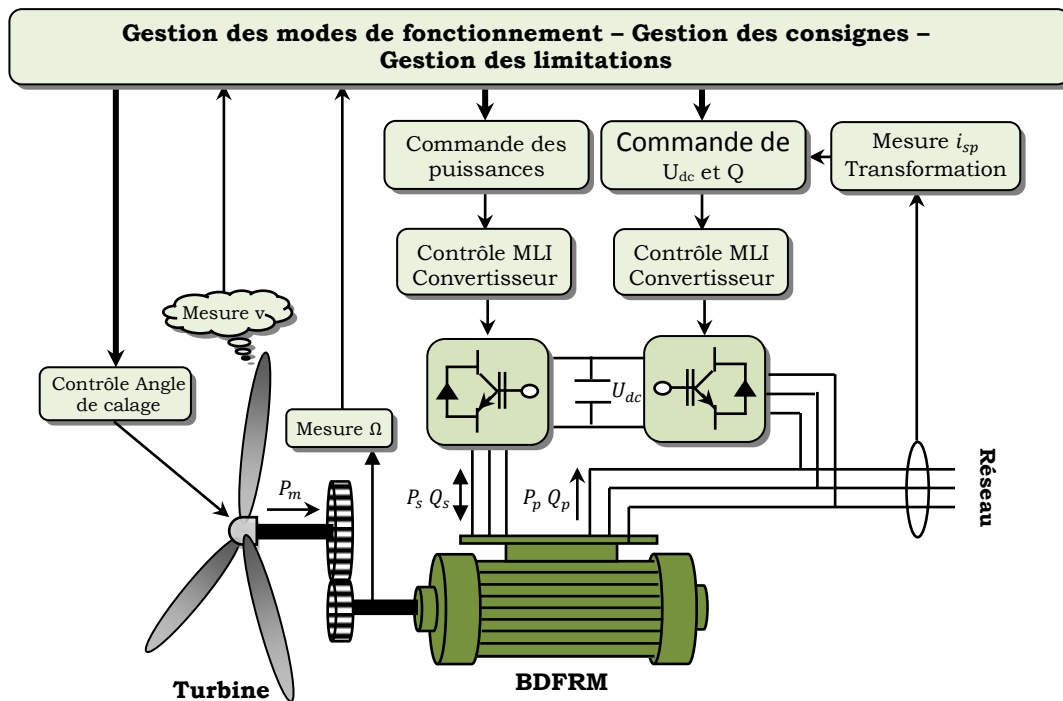


Fig. III. 1: Schéma global du système étudié.

D'après la figure III.1, ils y ont trois commandes sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent (a été citée au chapitre précédent)
- la commande du CCM en contrôlant les puissances active et réactive statorique de la BDFRM,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances réactive échangées avec le réseau.

III.2. Commande du convertisseur côté machine

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du convertisseur côté machine (CCM) dont le principe est illustré à la figure III.2.

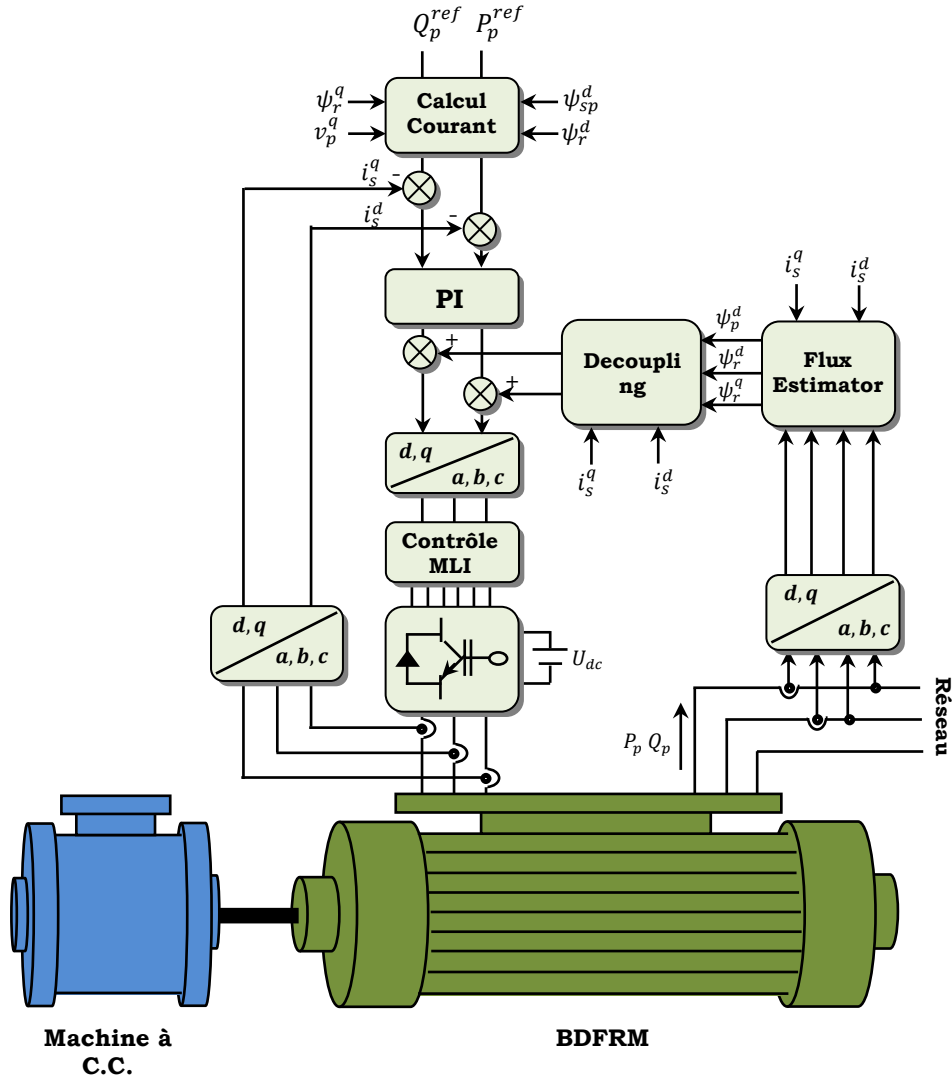


Fig. III. 2: Schémas du contrôle de la BDFRM.

Les contrôles des puissances active et réactive primaires seront obtenus en contrôlant les courants secondaire d'axes d-q de la BDFRM.

III.2.1 Principe de la commande vectorielle à flux orienté

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force est maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ.

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par *BLASCHKE* au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation indépendante (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel (d-q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante.

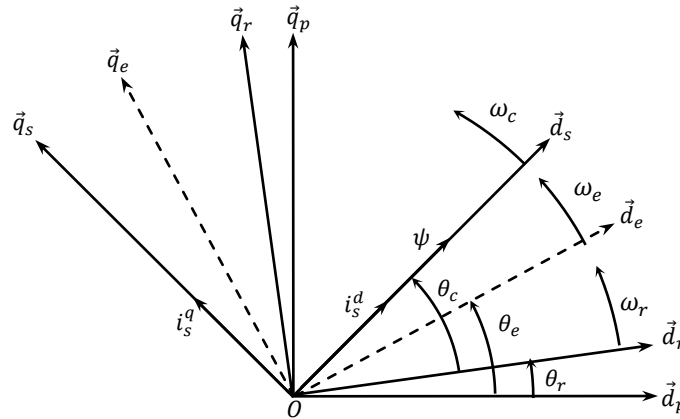


Fig. III. 3 : Position du référentiel par rapport au flux

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable.

Lors de la modélisation de la BDFRM dans un repère lié au champ tournant, les champs statoriques des deux bobinages et rotoriques et d'entrefer de la BDFRM tournent à la vitesse du référentiel (d, q) par rapport au stator du bobinage de puissance.

L'orientation de l'un de ces quatre champs suivant l'axe « d » du référentiel constitue le principe de base de la commande vectorielle. Grâce à la transformée de PARK, on obtient un modèle similaire à la MCC à excitation séparée.

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu est :

$$C_{em} = K \cdot \lambda_f \cdot i_a \quad (III.1)$$

$$\lambda_f = K' \cdot i_f \quad (III.2)$$

Le couple électromagnétique du bobinage de puissance que nous allons examiner :

$$T_e = \frac{3}{2} P_r (\lambda_{pd} I_{sq} - \lambda_{pq} I_{sd}) \quad (III.3)$$

En se basant sur cette équation, on peut réaliser un découplage de telle façon à ce que le couple soit commandé uniquement par le courant statorique en quadrature i_{sp}^q (l'axe q doit être dépourvu du flux ($\lambda_{sp}^q = 0$)), et le flux par le courant statorique du bobinage de commande i_{sc}^d .

La relation finale du couple du bobinage de puissance est:

$$C_{emp} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \lambda_{sp}^d \cdot i_{sp}^q \quad (III.4)$$

III.2.2 Stratégie de commande en puissances active et réactive de la BDFM

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie électrique de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions statoriques du bobinage de commande (BC), générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statorique du bobinage de puissance (BP).

Nous utilisons la modélisation diphasée de la BDFRM (voir Eqs. : II.50 II.51, II.52 et II.53). On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique du bobinage de puissance ψ_p .

Ainsi ;

$$\lambda_p^d = \lambda_p \quad \text{et} \quad \lambda_p^q = 0 \quad (III.5)$$

Et l'équation des flux statoriques du bobinage de puissance devient :

$$\begin{aligned} 0 &= L_p \cdot i_p^q + L_m \cdot i_s^q \\ \lambda_{pq} &= L_p \cdot L_{pd} - L_m \cdot L_{sd} \end{aligned} \quad (III.6)$$

Si on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_p , cela conduit à un flux statorique λ_p constant.

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statorique du BP, les équations des tensions statoriques du BP se réduisent à :

$$\begin{aligned} v_p^d &= \frac{d\lambda_p^d}{dt} \\ v_p^q &= \lambda_p^d \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (III.7)$$

Avec ω_p la pulsation électrique des grandeurs statoriques du BP.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{aligned} v_p^d &= 0 \\ v_p^q &= v_p \end{aligned} \quad (III.8)$$

A l'aide de l'équation (II.50) et du flux (III. 6), on peut établir le lien entre les courants statoriques de la machine de puissance et les courants statoriques du BC :

On a :

$$\begin{aligned}
 I_{pd} &= \frac{1}{L_p} \lambda_{pq} - \frac{L_m}{L_p} \cdot L_{sd} \\
 I_{pq} &= \frac{L_m}{L_p} \cdot L_{sq}
 \end{aligned}
 \tag{III.9}$$

Les équations de puissance :

$$\begin{aligned}
 p_p &= \frac{3}{2} V_{pq} I_{pq} \\
 Q_p &= \frac{3}{2} V_{pq} I_{pd}
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

Pour obtenir l'expression des puissances du BP en fonction des courants statoriques du BC, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation III.10 :

$$\begin{aligned}
 p_p &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_p} V_{sq} I_{sq} \\
 Q_p &= \frac{3}{2} V_{sq} \left(\frac{1}{L_p} \lambda_p - \frac{L_m}{L_p} I_{sq} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.13}$$

On remarque que l'équation III.13 fait apparaître que la puissance active statorique du BP P_p est directement proportionnelle au courant statorique en quadrature i_{sc}^q du BC. De plus, la puissance réactive Q_p est proportionnelle au courant statorique direct i_{sc}^d du BC.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions statoriques du BC qui seront appliqués à la BDFRM.

En remplaçant dans l'équation des flux statoriques du BC les courants statoriques du BP par l'expression III.10, on obtient :

$$\begin{aligned}
 \lambda_{sq} &= L_s \cdot L_{sq} - \left(\frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sq} \right) \\
 \lambda_{sd} &= L_s \cdot L_{sd} + \left(\frac{L_m}{L_p} \lambda_{pq} - \frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sd} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.14}$$

En remplaçant l'expression des flux précédente III.14 par leurs expressions dans les équations des tensions statoriques du BC (II.50) on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \left(L_s \cdot L_{sd} + \frac{L_m}{L_p} \lambda_{pq} - \frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sd} \right) - (\omega_r - \omega_p) \left(L_s \cdot I_{sq} - \left(\frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sq} \right) \right) \\
 V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \left(L_s \cdot L_{sq} - \left(\frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sq} \right) \right) + (\omega_r - \omega_p) \left(L_s \cdot I_{sd} + \left(\frac{L_m}{L_p} \lambda_{pq} - \frac{L_m^2}{L_p} \cdot I_{sd} \right) \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.15}$$

Les facteurs de dispersion s'écrivent comme suit :

$$\delta 1 = L_s - \frac{L_m^2}{L_p}, \delta 2 = \frac{L_m}{L_p}, \delta 3 = \frac{1}{L_p}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au stator du BC et les puissances statoriques du BC que cela

engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la BDFM qui sera le bloc à réguler par la suite.

III.2.2.1 Commande indirecte de la BDFRM

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [BOY 06]. On construit ainsi un schéma bloc permettant d’exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l’autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la BDFRM.

On part donc de la puissance statorique du BP en fonction des courants statoriques du BC et des expressions des tensions statoriques du BC en fonction des courants statoriques du BC.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure III.5.

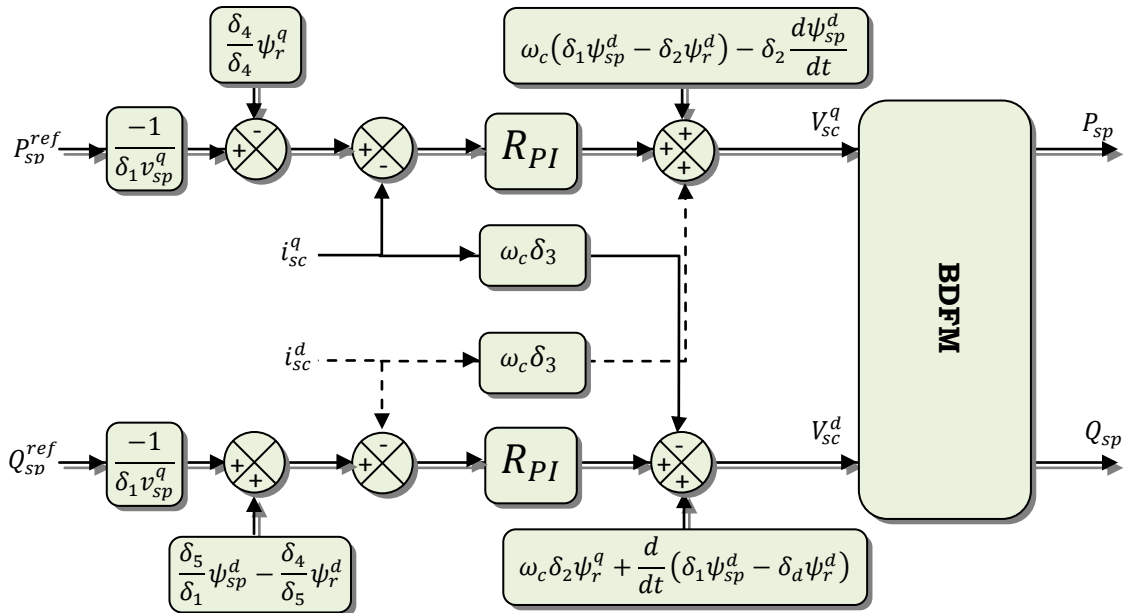


Fig. III. 4 : Schéma bloc de la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas).

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure III.5 où l’on trouve désormais une boucle de régulation des courants statoriques de BC dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l’on veut imposer à la machine. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure III.5.

III.2.2.3 Synthèse de la régulation PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la BDFRM en fonctionnement génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C’est pour cela qu’il a retenu notre attention pour une étude globale de système de génération éolien.

La figure III.5 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure III.6

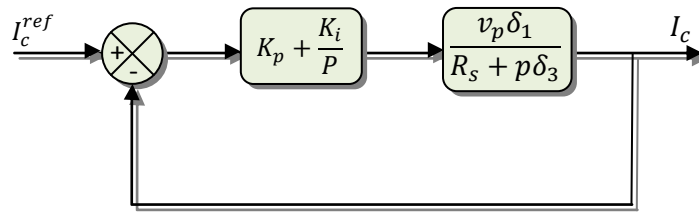


Fig. III. 5 : Système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{v_{sp} \delta_1}{p + \frac{R_s}{\delta_3}} \quad (III.16)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_s}{\delta_3} \quad (III.17)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{v_{sp} \delta_1}{\delta_3}}{p} \quad (III.18)$$

Cela nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1} \quad (III.19)$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 1ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1} \text{ et } K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_s}{v_{sp} \delta_1} \quad (\text{III.20})$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

III.4. Simulation du système éolien basé sur une BDFRM

La modélisation de la machine, de la partie mécanique et de la commande indirecte que nous avons proposé a été implantée dans l'environnement MATLAB/Simulink/SimPowerSystem afin d'effectuer des tests de la régulation.

Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la BDFRM alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulo-sinusoïdal, Dans ce qui suit, nous avons utilisé la technique MLI avec la fréquence de la porteuse (dents de scie) de 3.5 KHz.

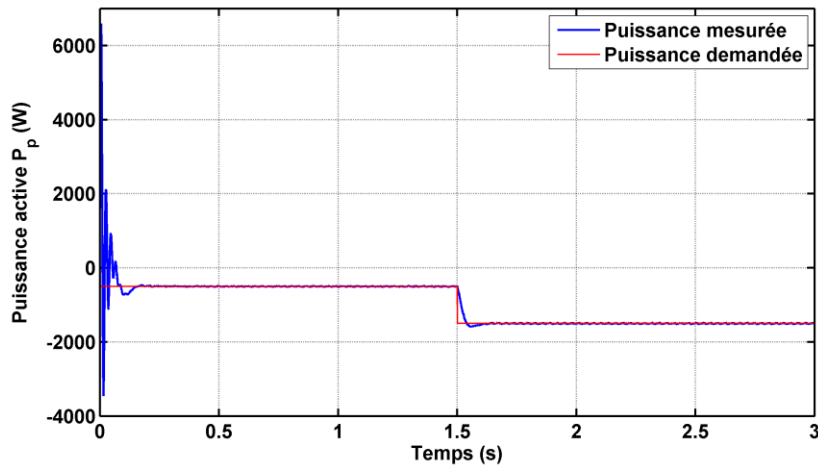


Fig. III. 6: Puissance active statorique du bobinage primaire.

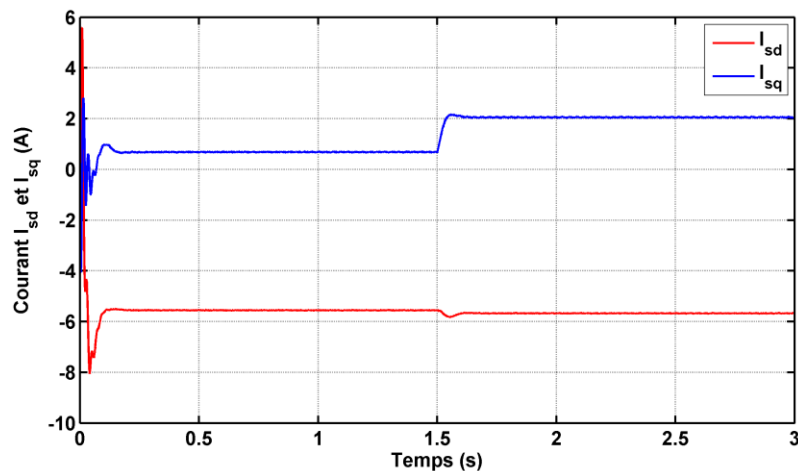


Fig. III. 7: Courant statorique du bobinage secondaire selon les axes d-q.

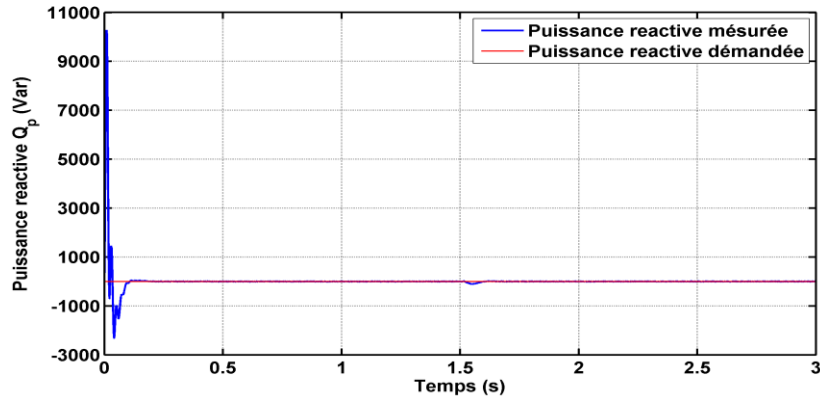


Fig. III. 8: Puissance réactive statorique du bobinage primaire.

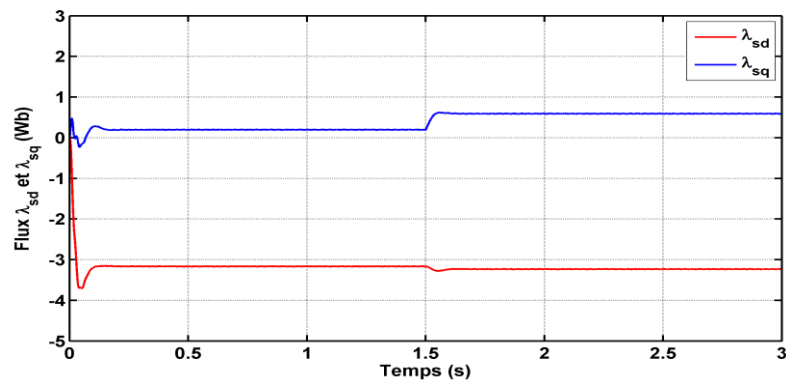


Fig. III. 9: Flux statorique du bobinage primaire selon l'axe d et q.

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.

Aussi, la commande de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle de la BDFRM pour un fonctionnement en génératrice pour une vitesse de rotation constante. Aussi, On conclut que la commande vectorielle nous permet de contrôler les puissances active que pour la puissance réactive. Et, la commande de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

Conclusion Générale

Le but de cette thèse reste l'exploration des possibilités d'introduction de la BDFRM dans des applications éoliennes. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation et la commande vectorielle.

Dans le contexte d'énergie éolienne, un état de l'art de ces systèmes est présenté. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie moteur de développement durable.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion, différents types d'éoliennes. Et par la suite, une présentation des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien a été faite. Trois grandes familles de machines sont présentées : les machines asynchrones, les machines synchrones et les machines à structure spéciale.

On a conclu que la machines asynchrones à double alimentation sans balais à reluctance variable BDFRM regroupe les avantages de la machine asynchrone à cage et de la machine asynchrone à double alimentation ; de même qu'elle présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'elle autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation de la BDFRM. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices. Nous avons constaté que le modèle de la BDFRM est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, et où la transformation de Park nous a permis de les simplifier. Ainsi, la modélisation et les résultats de simulation de la BDFRM ont été présentés et discutés.

Dans la troisième partie, nous avons présenté le modèle de l'onduleur et son principe de fonctionnement, de même que la technique de commande MLI. Nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle de la BDFRM pour un fonctionnement en générateur pour une vitesse de rotation quelconque.

A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant statorique de la machine de commande contrôle la puissance active, et la

composante en quadrature contrôle la puissance réactive. Ceci nous a permis d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

A la fin de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la BDFRM associé à un système de conversion d'énergie et d'un convertisseur statorique.

D'après les résultats obtenus, on peut confirmer que les performances de la commande sont satisfaisantes et la régulation des puissances transitées acceptable.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives de recherche et de réalisations pratiques intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter la machine sont envisageables :

Recommandations de Travaux Futurs

Les systèmes éoliens basé sur la BDFRM, c'est un axe de recherche assez motivant pour les fabricants de systèmes éoliens qui actuellement utilisent la MADA.

Les travaux futurs doivent se diriger vers :

- 1) l'étude approfondie sur la modélisation de la BDFRM en tenant compte des pertes de fer ;
- 2) L'élimination des harmoniques de courant injectés au réseau ;
- 3) Développement d'algorithmes hors ligne d'identification de paramètres ;
- 4) l'Augmentation de l'insensibilité de la commande face aux incertitudes des paramètres de la machine ;

Tout ceci montre que la thématique de la génération d'énergie électrique de l'éolienne est ouverte et offre de nombreux sujets de recherche pour l'avenir.

Travaux Cités

- [ABB 06] M. ABBAS, M. MECHENTEL « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne » Thèse D'Ingénieur d'Etat, ENP, El-Harrach, Algérie, 2006.
- [ABD 97] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [ABD 07] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de doctorat, INPT, France, 2007.
- [ABD 08a] L. Abdelhamid « Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens » These de magister, Université de Batna, 2008.
- [ABD 08b] E. Abdi, X. Wang, S. Shao, R. McMahon and P. Tavner "Performance Characterisation of Brushless Doubly-Fed Generator", 2008.
- [ADA 07] M. Adamowicz, R.Strzelecki and D. Wojciechowski " Steady State Analysis of Twin Stator Cascaded Doubly Fed Induction Generator" CPE 2007. P 5.
- [ADA 08] M. Adamowicz and R. Strzelecki "Cascaded Doubly Fed Induction Generator for Mini and Micro Power Plants Connected to Grid" EPE-PEMC, 2008, p 1729-1733.
- [ADA 09] M. Adamowicz and R. Strzelecki "Cascaded Doubly Fed Induction Generator with a Back-to-Back Converter Connected to a Small Distributed Generation System"EVER MONACO, MAR 2009.
- [ADE 15] Sul Ademi, Milutin G. Jovanovic, and Mohammed Hasan, "Control of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generators for Wind Energy Conversion Systems " IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. 2015
- [ACH 07] R. ACHOURI, M. HIDOUCHE "Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone » » Thèse D'Ingénieur d'Etat, ENP d'Alger, 2007.
- [AMI 08] H. AMIMEUR Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement » Thèse de magister, Université de Batna, 2008.
- [ASS 09] Site Internet « fee.asso.fr » 2009
- [BAS 03] D. Basic, J. G. Zhu and G. Boardman "Transient Performance Study of a Brushless Doubly Fed Twin Stator Induction Generator"IEEE. Tra Ene Con. Vol. 18, No. Sep 2003. P 400-408.
- [BEL 07] CH. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne étude et expérimentation » Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2007.
- [BOA 01] G. Boardman, J. G. Zhu, and Q.P. Ha "Dynamic and Steady State Modeling of Brushless Doubly Fed Induction Machines" ICEMS, Elec. Mach. Syst. Vol. 01,2001, P 412-416.

- [BOA --] G. Boardman, J. G. Zhu, and Q.P. Ha “General Reference Frame Modeling of the Doubly Fed Twin Stator Induction Machine Using Space Vectors”
- [BOY 06] A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [BOU 99] N. BOUBACAR « Conception technico-économique d'un système de pompage autonome photovoltaïque aérogénérateur » Thèse de doctorat, Université de Montréal, 1999.
- [BOU 00] M.L DOUMBIA « Outil D'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machine électrique : exemple d'application » Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2000.
- [BRE 94] T. Brehm and K. Rattan “The Classical Controller A Special Case of the Fuzzy Logic Controller” Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control FP-15 4:30 Lake Buena Vista, FL - December 1994.
- [CAO 97] M. TA CAO « COMMANDE NUMÉRIQUE DE MACHINES ASYNCHRONES PAR LOGIQUE FLOUE » Université Laval, Ph.D, 1997.
- [CHI 01] N.Chilakapati, V.S.Ramsden and V. Ramaswamy “Performance evaluation of doubly fed twin stator induction machine drive with voltage and current space vector control schemes” IEE. Proc. Electr. Power., Vol. 148, No. 3, May 2001. P 287-292
- [CAM 03] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat, ÉNSAM France, 2003.
- [DAI 07] Y. DAILI »Contrôle de la fréquence de commutation des hystérésis utilisés dans les commandes d'une machine à induction » Thèse de Magister, Université de BATNA, 2007.
- [DEY 13] C. Dey, R. K. Mudi “Dharmana SimhachalamA simple nonlinear PD controller for Integrating processes » ISA Transactions, 2013.
- [ELA 04] S. EL AIMANI « Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension » Thèse de doctorat, Université De Lille, 2004.
- [ELB 09] Y. ELBIA « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » Thèse de Magister, Université de BATNA, 2009.
- [FEN 06] G. Feng “A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems” IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 14, NO. 5, OCTOBER 2006.
- [GAI 10] A. GAILLARD, « Système éolien basé sur une MADA - contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » Thèse de doctorat à l'Univ. Henri Poincaré, Nancy-I, 30 avril 2010.
- [GOR 96] B.V. God, G.C. Alexander, R. Se, A.K. Wallace “A Fuzzy Controller for Terminal Quantity Regulation in a Doubly-Fed, Stand-alone Generator System” 1996 IEEE

- [HAM 04] A. Hamadi « Amélioration des performances du filtre actif application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur flou » MONTRÉAL, LE 30 NOVEMBRE 2004.
- [HAM 03] L. HAMANE »les ressources éoliennes de l'algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11.
- [HAM 08] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [HAY 99] K. Hayashi, A. Otsubo, S.Murakami and M. Maeda "Realization of nonlinear and linear PID controls using simplified indirect fuzzy inference method" Fuzzy Sets and Systems 105 (1999) 409~,14
- [HOP 99] B.Hopfensperger, D.J.Atkinson and R.A.Lakin " Stator flux oriented control of a cascaded doubly-fed induction machine"IEE Proc. Electr. Power Appl. Vol. 146, No. Nov 1999. P 597-605.
- [HOP 00] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson and R. A. Lakin "the application of field oriented control to a cascaded doubly-fed induction Machine" IEE, Powe. Elec. Vari. Spee. Driv, No 475, 2000, P 262-267.
- [HOP 01] B.Hopfensperger, D.J.Atkinson and R.A.Lakin "Combined magnetising flux oriented control of the cascaded doubly-fed induction machine" IEE Proc, Elec Appl, Vol. 148, No, 4 July 2001, p 354-362.
- [HOP-01] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, "Doubly-fed a.c. machines : classifications and comparaison", EPE conference 2001-Gratz, DS 3.4-2.
- [JAL 09] F. Jallali and A. Masmoudi "Investigation of the Transient Behavior of Brushless Cascaded Doubly Fed Machines" EVER MONACO, Mar 2009, p 6.
- [JOU 07] M. JOURIEH »Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien » Thèse de doctorat, ENSAM de France, 2007.
- [KAT 01] S. Kato, N. Hoshi and K. Oguchi "A Low-Cost System of Variable-Speed Cascaded Induction Generators for Small-Scale Hydroelectricity »IEEE, Ind. Appl. Vol.2, 2001, P 1419-1425.
- [KAT 03] S. Kato, N. Hoshi and k. Oguchi, "Proposed adjustable-speed cascaded induction generators that will meet industrial and environmental needs" IEEE. Ind. Appl. Jul. 2003. Vol. 9, 2003, P 32-38.
- [KHO 06] S. KHOJET EL KHIL »Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) » Thèse de Doctorat, INPT de France et ENI de Tunis, 2006.
- [LAV 05] N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.
- [LEC 04] L. LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » Thèse de doctorat, LEEP de Lille, 2004.

- [LEE 11] C. C. LEE "Fuzzy Logic in Control Systems Fuzzy Logic Controller, Part I" IIXr TRANSACTIONS ON SYSTTMS. MAN, ANI) C'YI3TRYTTIC'S. VOI.. 20. NO. 2. MAK'kl/APKII. 1990.
- [LEE 90] C. C. LEE "Fuzzy Logic in Control Systems Fuzzy Logic Controller, Part I", IIXr TRANSACTIONS ON SYSTTMS. MAN, ANI) C'YI3TRYTTIC'S. VOI.. 20. NO. 2. MAK'kl/APKII. 1990.
- [LI 89] Wei Li "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller" IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 6, NO. 4, NOVEMBER 1998.
- [LI 95] Han-Xiong Li and H. B. Gatland "A new methodology for designing a fuzzy logic controller" IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. 25, NO. 3, MARCH 1995
- [LI 01] Q. Li and Z. P. Pan "the modeling and simulation of brushless doubly fed generator of wind power generation system" IEEE. Pow. Elec. Driv. Sys. Vol.2, 2001. P 811-814.
- [LIN 03] M.LINDHOLM » Doubly Fed Drives for Variable Speed Wind Turbines Speed Wind Turbines" PHD, University of Denmark, 2003.
- [LOP 06] M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [MEK 04] N. MEKKAOUI »Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèse de Magister, Université de BATNA, 2004.
- [MER 07] F. MERRAHI »Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation _ Application à l'énergie éolienne_ » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2007.
- [MER 08] N. K. Merzouk « Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?, » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7
- [MIC 95] E. W. Michael S. B. Alan and K. Wallace, "Electromagnetic Mechanism of Synchronous Operation of the Brushless Doubly-Fed Machine", 1995.
- [MIR 05] A. MIRECKI »Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [MIZ 95] M. Mizumoto "Fuzzy controls by product sum grayity method dealing with fuzzy rules of emphatic and suppressive types" Jour. IJUFKBS, Vol. 2, No. 3 pp. 305-319. 1994.
- [MIZ 95] M. Mizumoto "Realization of PID controls by fuzzy control methods" Fuzzy Sets and Systems 70 (1995) 171-182.
- [MIZ 96] M. Mizumoto "Product-sum-gravity method=fuzzy singleton-type reasoning method=simplified fuzzy reasoning method" Proceedings of the Fifth IEEE Fuzzy Systems, 1996.

- [PAN 12] S. Panda, B.K. Sahu, P.K. Mohanty "Design and performance analysis of PID controller for an automatic regulator system using simplified particle swarm optimization" *Journal of the Franklin Institute* 349 (2012) 2609–2625.
- [ORT 84] H. Ortmeyer and U. Borger "Control Of Cascaded Doubly Fed Machines For Generator Applications" *IEEE Tra Pow Sys*, Vol. PAS-103, No. Sep 1984, p 2564-2571.
- [PAT 05] N. Patin, E. Monmasson and J.P. Louis « Analysis and control of a cascaded doubly-fed induction generator », *IECON*, 2005, P 2487-2492.
- [PAT 06] N. Patin « analyse d'architecture, modélisation et commande de générateurs pour réseaux autonomes et puissants » These de doctorat, Univ Cachan. 2006.
- [PAT 09] N. Patin, E. Monmasson and J.P. Louis "Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids" *IEEE Tra Ind Ele*, Vol. 56, No. 10, Oct 2009. P 4207-4219.
- [PET 03] A. PETERSSON "analysis, modeling and control of doubly fed induction generators for wind turbines" PHD, University of CHALMERS, 2003.
- [POI 03] F. PITIERS »Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [POZ 03] F. J. POZA LOBO « Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable » These de Doctorant. Ins Nat. Poly Grenoble. 2003.
- [POZ 06] J. Poza, E. Oyarbide, D. Roye and M. Rodriguez "Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine" *IEE Proc. Elec. Powe. Appl*, Vol. 153, No. Sem 2006. P 726-734.
- [PRO 09] K. Protsenko and D. Xu "Modeling and Control of Brushless Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Applications" *IEEE Tra, Pow, Ele*, Vol, 23, No. 3, May 2008, p 1191-1197.
- [QIA 96] W. Z. Qiao et M. Mizumoto "PID type fuzzy controller and parameters adaptive method" *Fuzzy Sets and Systems* 78 (1996) 23-35
- [ROB 04] Paul C. Roberts "A Study of Brushless Doubly-Fed Induction Machines" university of combridge, doctorat PHD, 2004.
- [RUN 06] F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, H. Voltolini "performance and Vibration Analysis of a 75 kW Brushless Double Fed Induction Generator Prototype" *IAS*, Vol. 5, 2006, P 2395-2402.
- [SAR 08] I. SARASOLA ALTUNA « Control robusto de una máquina de inducción doblemente alimentada por el estator en aplicaciones de generación de energía a velocidad variable » Tesis Doctoral en el programa de Doctorado en AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
- [SMI 66] B. H. Smith "Theory and Performance of a Twin Stator Induction Machine" *IEEE. Tra Pow. App. Sys.*, Vol. PAS-85, No 2. Feb 1966. P 123-131.

- [SHA 09] S. Shao, E. Abdi, F. Barati and R. McMahon "Stator-Flux-Oriented Vector Control for Brushless Doubly Fed Induction Generator" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 10, OCTOBER 2009.
- [SON 01] B. Songjiang, H. Yikang and Z. Hui "Modeling and operation analysis of the cascaded brushless doubly fed machine" ICEMS, Vol. 2, 2001, P 942-945.
- [THE 09] C. THÉORÉT «Elaboration d'un logiciel d'enseignement et d'application de la logique floue dans un contexte d'automate programmable » M.ing, MONTRÉAL, LE 16 AVRIL 2009.
- [TIR 10] Z. TIR « contribution à l'étude d'un aerogenerateur asynchrone » thèse de magistère, univ. Setif, 2010.
- [TIR 13a] Z. Tir and R. Abdessemed "Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integrator Controller Of A Novel BDFIG For Wind Energy Conversion" Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 13, No. 2, 2013, 65-72, DOI: 10.2478/aei-2013-0030.
- [TIR 13b] Z. Tir and R. Abdessemed "Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integrator-Derivation Controller Of A Novel BDFIG For Wind Energy Conversion" JEE, Vol. 14, N°1, 2014.
- [VID 04] P.E. VIDAL « Commande non linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation » Thèse de doctorat, INP de TOULOUSE, 2004.
- [Yao 08] L. Yao, K. J. Bradley, P. Sewell, D. Gerada "Cascaded Doubly Fed Induction Machine System Modelling Based on Dynamic Reluctance Mesh Modelling Method" ICEM, 2008, ID 993, p 1-5.
- [ZAD 65] L. A. Zadeh "Fuzzy Sets" info. And Cont. vol. 8, pp. 338-353 (1965).
- [WWE 12] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fev 2009, Allemagne, p.17
- [WAN 06] Q. Wang, X. Chen, Y. Ji "Fuzzy-based Active and Reactive Control for Brushless Doubly-fed Wind Power Generation System" 2006.
- [WAN 11] S. C. Wang and Y.H. Liu, "A Modified PI-Like Fuzzy Logic Controller for Switched Reluctance Motor Drives" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 5, MAY 2011.
- [WAL 90] A. k. Wallace, R. Spee and H. k. Lauw "The potential of brushless doubly-fed machines for adjustable speed drives"IEEE. 1990. P 46-50.
- [WIL 97a] S. Williamson, A.C. Ferreira, A.K. Wallace, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: Analysis", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.144, No. 2, March 1997, pp. 111-122.
- [WIL 97b] S. Williamson, A.C. Ferreira, "Generalised theory of the brushless doublyfed machine. Part 2: Model verification and performance", *IEE Proc.-Electr. PowerAppl.*, Vol. 144, No. 2, March 1997, pp. 123-129.

Annexe (A) : Calcul d'un régulateur PI avec compensation

Dans cette annexe nous développons une autre conception du régulateur PI basée sur la compensation de la constante de temps de ce dernier avec celle du processus de la grandeur à réguler (figure B.1).

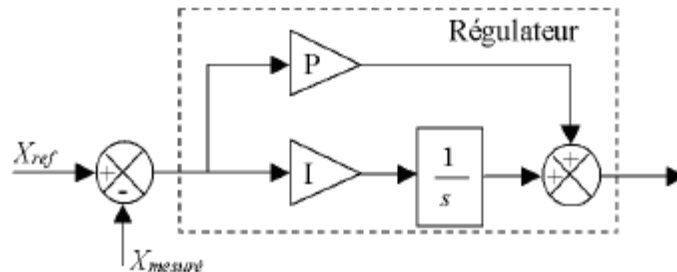


Fig. B.1 : Schéma bloc du correcteur PI avec compensation de la constante de temps

La forme du correcteur est la suivante

$$C(s) = P + \frac{I}{s}$$

Avec : P : le gain proportionnel du régulateur.

I : le gain intégral du régulateur. Pour une fonction de transfert d'un processus associée à ce correcteur :

$$H(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$H_{bo}(s) = \frac{K \left(P + \frac{I}{s} \right)}{1 + \tau \cdot s} = \frac{K(P \cdot s + I)}{s \cdot (1 + \tau \cdot s)} = IK \cdot \frac{1 + \frac{P \cdot s}{I}}{s \cdot (1 + \tau \cdot s)}$$

Si on pose $\frac{P}{I} = \tau$ Alors

$$H_{bo}(s) = \frac{I \cdot K}{s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$H_{bf}(s) = \frac{I \cdot K}{I \cdot K + s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{I \cdot K} \cdot s}$$

Le temps de réponse t_r du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = 3 \cdot \frac{1}{I \cdot K}$$

Or,

$$I = \frac{P}{\tau}$$

Alors

$$t_r = 3 \cdot \frac{\tau}{P \cdot K}$$

D'où

$$P = \frac{3 \cdot \tau}{t_r \cdot K} \quad I = \frac{3}{t_r \cdot K}$$

Annexe (B) : Paramètre de la machine

Rotor inertia [J]	0.1 kgm ²
Primary resistance [R_p]	11.1 Ω
Secondary resistance [R_s]	13.5 Ω
Primary inductance [L_p]	0.41 H
Secondary inductance [L_s]	0.57 H
Mutual inductance [L_{ps}]	0.34 H
Rotor poles [p_r]	4
Primary power [P_r]	1.5 kW
Rated speed [n_r]	750 rev/min
Stator currents [$I_{p,s}$]	2.5 A rms
Stator voltages [$V_{p,s}$]	415 V rms
Stator frequencies [$f_{p,s}$]	50 Hz
Winding connections	Y/Y
Stator poles [p/q]	6/2