

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques
LSP-IE Batna

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de **Magister**

Option : **Réseaux Electriques**

Présenté Par

RIHANI LAZHAR

(Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université de Batna)

Thème

**Modélisation et Commande de la Génératrice à Induction
Double Alimentée Couplée sur un Réseau Electrique**

Soutenu le 19/ 01 /2012
Devant le jury composé de :

Président	Amor GUETTAFI	Professeur	Univ. Batna
Rapporteur	Saïd DRID	Professeur	Univ. Batna
Examineur	Djamel RAHEM	Maître de Conférences	Univ. Oum El Bouaghi
Examineur	Bachir ABDELHADI	Maître de Conférences	Univ. Batna
Examineur	Saïd BENAGGOUNE	Maître de Conférences	Univ. Batna



A la mémoire de mes grands parents

Rihani ' Mohamed Ben Ali et Aicha '

Haddad Salah

A la mémoire de :

Chadda Hocine , Kadjoudj Abdelhakim

Enseignants à l'université de Batna

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes Parents

Mon oncle Bouha

Mes Frères et Sœur

Ma femme

Mes Enfants Ichrak,Ikram

Karim et Assil

Tous mes amis

A toute la promotion Ingénieur 1994

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du primaire à l'université, à ceux qui ont marqué ma formation d'électrotechnique : Rachid Abdessemed , Nait-Said Mohamed said , Guettafi Amor, Maakouf Abdessalam Betta Ammar surtout à Mon encadreur Dr : Drid Said pour son soutien, et conseils durant la réalisation de ce travail, à Mr : Benagoune Said pour son encouragement sans oublier les membres de jury Djamel Rahem et Bachir Abdelhadi qui honorent par leurs présences à l'évaluation de ce modeste travail .

Je tiens également à remercier mes amis qui ne cessent de me pousser à reprendre mes études après cette longue période d'éloignement, Ahmed mansouri, Redha Benzid, ,Fezani yassine , berkat Abdelhakim, Diab Tahar.

A tous les collègues du travail .

Rihani Lazhar

SOMMAIRE

NOTATIONS	1
------------------	----------

INTRODUCTION GENERALE

1 Contexte & Problématique	2
2 Objectif du mémoire	3
3 Structure de la thèse	3

CHAPITRE 1

GENERATEURS ELECTRIQUE UTILISES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES

1.1 Introduction	5
1.2 Générateurs électriques et configurations	7
1.2.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone	7
1.2.2 Machine asynchrone à rotor bobiné et double alimentation	9
1.2.3 Systèmes utilisant la machine synchrone	13
1.2.4 Machines à structures spéciales	14
1.3 Limites Réactives des Générateurs	15
1.4 Conclusion	16

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA GENERATRICE A INDUCTION DOUBLE ALIMENTEE

2.1. Introduction	18
2.2 Modélisation vectorielle de la GADA	19
2.3 Référentiels d'observations	21
2.4 Mode de fonctionnement de la GIDA	23

2.4.1 GIDA autonome	24
2.4.2 GIDA non autonome	24
2.4.3 Simulation de la GIDA couplée au réseau	25
2.4.4 Discussions des Résultats	33
2.5 Conclusion	33

CHAPITRE 3
**COMMANDE VECTORIELLE DE LA GENERATRICE A INDUCTION DOUBLE
ALIMENTEE**

3.1 Introduction	35
3.2 Principe de la commande à flux orienté	36
3.3 Application de la commande vectorielle à la GIDA	36
3.3.1 Commande directe	39
3.3.1 La commande indirecte	40
3.4 Simulation	42
3.4.1 La commande indirecte en boucle ouverte	42
3.4.2 Interprétation de résultats	44
3.4.3 La commande indirecte en boucle fermée	45
3.4.4. Interprétation de résultats de simulation obtenus	46
3.5 Conclusion	46

CHAPITRE 4
**CAPACITE DE PUISSANCE DE LA GENERATRICE A INDUCTION DOUBLE
ALIMENTEE**

4.1 Introduction	47
4.2 Modèle de GIDA en régime permanent	48
4.3 Etude analytique par circuit équivalent	49
4.4 Les puissances active et réactive de la GIDA	51
4.5 Capacités des puissances P_Q de la GIDA	52
4.6 Conclusion	56

CONCLUSION GENERALE

1	Contexte	57
2	Perspectives	58

BIBLIOGRAPHIE

	Références bibliographiques	59
--	-----------------------------	----

NOTATIONS ET SYMBOLES (*)

s, r	: Indice du rotor, du stator.
d, q	: Indices des composantes orthogonales directe et en quadrature
\bar{x}	: Grandeur complexe tel que : $\bar{x} = x_d + jx_q$ où $j = \sqrt{-1}$ \bar{x} peut être tension \bar{u} , courant \bar{i} ou flux $\bar{\phi}$
\bar{x}^*	: Complexe conjugué
R_s, R_r	: Résistance statorique, rotorique
$P_{s,r}$: Puissance active stator/rotor
$Q_{s,r}$: Puissance réactive stator/rotor
$S_{s,r}$: Puissance apparente stator/rotor
P_{mec}	: Puissance mécanique
L_s, L_r	: Inductance cyclique propre statorique, rotorique
T_s, T_r	: Constante de temps statorique, rotorique ($T_{s,r} = L_{s,r} / R_{s,r}$)
σ	: Coefficient de dispersion total $\sigma = 1 - M^2 / (L_s L_r)$
M	: Inductance cyclique mutuelle stator-rotor
θ	: Position absolue du rotor
δ	: Angle de charge
Ω	: Vitesse du rotor
ω_s	: Pulsation des courants statoriques
ω_r	: Pulsation des courants rotoriques
P	: Nombre de paires de pôles
<i>réf</i>	: Indice indiquant la référence (la consigne)
\sim	: Symbole indiquant la mesure
$\hat{}$: Symbole indiquant l'estimation
*	: Symbole indiquant la commande
g	: glissement de la machine asynchrone
C_e	: Couple électromagnétique
f ou f_s	: Fréquence du Réseau
MADA, GIDA:	Machine Asynchrone double alimentée /Génératrice à induction double alimentée

(*) : D'autres notations et symboles spécifiques peuvent être définis dans les chapitres, s'il y a lieu

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE & PROBLEMATIQUE

L'augmentation de la demande énergétique de plus en plus est le grand défi qu'affronte le monde de nos jours. L'accroissement rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Cette augmentation se traduit, en réalité, par une augmentation des prix du pétrole qui représente la source la plus importante de l'énergie. La réserve mondiale du pétrole diminue de plus en plus et dans les années qui suivent il n'y aura pas assez du pétrole pour couvrir la demande. Le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient. L'énergie nucléaire n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques, technologique ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique. L'utilisation de ces sources conventionnelles est alors limitée ou n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement. Pour toutes ces raisons le monde se dirige vers les sources renouvelables, le soleil, le vent, les courants sous-marins et d'autres pour produire de l'électricité. Actuellement l'électricité renouvelable ne fait qu'une petite portion de l'énergie produite mais cette portion va augmenter de plus en plus. Les sources d'énergie renouvelable, vu leurs puissances et leurs installations dans les réseaux de distribution, sont appelées aussi la production décentralisée ou la génération d'énergie dispersée. Les réseaux de distribution sont la dernière phase dans la procédure de transport de l'énergie électrique à partir des centrales de production aux consommateurs. La production décentralisée basée sur des unités de production traditionnelle, renouvelable ou cogénération, s'installe de plus en plus dans les réseaux de distribution. Les générateurs électriques avec des turbines à combustion, les micro-turbines à combustion, les éoliennes, les hydroliennes, les photovoltaïques et d'autres générateurs peuvent se trouver en cogénération dans un même réseau. Le réseau de distribution est devenu un réseau presque complet composé des producteurs, des consommateurs et de la transmission. L'écoulement de puissance et le bilan de tension ne dépendent plus des consommateurs mais aussi des producteurs. Le problème de la stabilité bien connu dans les réseaux de transport est alors nouveau dans les réseaux de distribution. Les stabilité angulaires, de tension et de fréquence doivent être revues, [1], ce qui signifie que la stabilité est toujours un problème actuel.

Bien que les capacités de puissance du générateur synchrone aient été intensivement étudiées, les capacités de puissance de la génératrice à induction double alimentée (GIDA) sont peu connues. Ce genre de générateur est largement répandu dans les applications à vitesse variable tel que l'énergie éolienne, et ses possibilités de puissance réactive doivent être connues afin de projeter les possibilités réactives des fermes de vent selon les exigences des codes des réseaux électriques [2], [3], [4] et [5].

Connue depuis 1899, la génératrice à induction double alimentée, est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies précitées, diverses applications de ce type de machine sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo-synchrones et hyper-synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur [6].

2. OBJECTIF DU MEMOIRE :

Le présent mémoire traite le problème du contrôle de puissance active et réactive de la génératrice double alimentée à base de commande vectorielle par orientation du flux statorique. Ainsi qu'une étude de la capacité des puissances active et réactive.

3. STRUCTURE DU MEMOIRE :

Le présent travail est structuré en quatre chapitres:

Chapitre 1 : Générateurs Electrique utilisés dans les Réseaux Electriques

Le premier chapitre présentera une description des générateurs électriques utilisés dans les réseaux et leurs configurations, ainsi que quelques techniques de commande des puissances. La capacité du générateur synchrone sera également exposée.

Chapitre 2 : Modélisation de la Génératrice à Induction Double Alimentée

Dans ce chapitre sera présentée la modélisation de la génératrice à induction à rotor bobiné dans un référentiel commun. Ceci a pour objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans les deux régimes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone.

Chapitre 3 : Commande Vectorielle de la Génératrice à Induction Double Alimentée

Dans ce chapitre sera exposé la loi de commande pour la GIDA basée sur l'orientation du flux statorique tout en imposant une orthogonalité entre ce flux et la tension statorique dans le souci d'avoir une commande linéaire et découplée entre les puissances active et réactive statorique.

Chapitre 4 : Capacité de Puissance de la Génératrice à Induction Double Alimentée

Ce chapitre traitera l'analyse par le circuit équivalent de la GIDA en régime permanent afin de déterminer les capacités de puissance de ce type de machine et leurs limites de fonctionnement.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale où il sera exposé un bilan et les perspectives à venir.

CHAPITRE 1

**GENERATEURS ELECTRIQUES UTILISES DANS LES
RESEAUX ELECTRIQUES****1.1 INTRODUCTION**

La recherche dans le domaine des énergies renouvelables est en plein développement depuis quelques années partout à travers le monde, que ce soit l'énergie marémotrice, ou l'énergie éolienne. De par son caractère pseudo aléatoire, l'énergie éolienne pose beaucoup de défis afin d'avoir une production de puissance électrique constante, et un facteur de puissance aussi proche de l'unité que possible. Deux approches sont possibles : un entraînement à vitesse constante et un entraînement à vitesse variable. La production d'énergie électrique à vitesse fixe est peu souhaitable, car le comportement dynamique en cas de défaut est potentiellement dangereux. [7], [8] et [9].

Le raccordement des générateurs éoliens au réseau existant pose plusieurs problèmes. Car la modélisation des phénomènes mécaniques entrant en jeu dans la puissance transmise au rotor du moteur d'une éolienne a permis de conclure que le couple électromagnétique du moteur n'était pas constant mais périodique à cause de l'effet d'ombre de la tour [10]. La conséquence majeure de ce couple non constant est la présence d'oscillations de tensions au point de

raccordement au réseau électrique, oscillations sont plus importantes dans le cas d'un réseau faible. De plus l'utilisation de machines asynchrones (MAS) comme générateur entraîne une dégradation du facteur de puissance, à cause de la nécessité de fournir de la puissance réactive à la machine. Il existe deux types de régulation du facteur de puissance :

- ✓ Soit la compensation réactive est faite de manière globale avant le point de raccordement ou PCC (Point of Common Coupling). Cette technique a cependant le désavantage de ne pas tenir compte de chaque éolienne.
- ✓ Soit la compensation est faite éolienne par éolienne, en utilisant un montage dit de Scherbius.

De plus en plus, l'utilisation de montages à vitesse variable à tension et fréquence constantes est nécessaire. La machine asynchrone à rotor bobiné est de plus en plus utilisée, car à travers le circuit du rotor, un réglage de puissance réactive est possible par le montage de type Scherbius. Celui-ci consiste en un convertisseur de puissance lié au rotor et au réseau, de fait que son dimensionnement ne dépend que d'une faible partie de la puissance électrique totale (énergie de glissement). Le dimensionnement du convertisseur dépend de plusieurs paramètres [11]:

- ✓ la variation de vitesse considérée (autour de la vitesse de synchronisme),
- ✓ la valeur absolue de puissance réactive générée ou consommée au rotor,
- ✓ les caractéristiques de la machine.

L'avantage de cette configuration réside dans le coût peu élevé du convertisseur, puisque celui-ci n'est dimensionné que pour environ 20 % de la puissance électrique totale. En outre, le montage permet un contrôle découplé puissance active / puissance réactive, pour avoir un facteur de puissance unitaire.

Les objectifs principaux du système de commande sont les suivants :

- ✓ Obtenir un facteur de puissance unitaire côté stator,
- ✓ Obtenir une puissance active et une tension constante côté stator, ce malgré les oscillations de couple dues au comportement mécanique de l'éolienne.

Le contrôle de la puissance active et de la puissance réactive est réalisé via les courants rotoriques pour avoir un contrôle découplé [12]. Il existe plusieurs méthodes de contrôle de puissance réactive sur une machine asynchrone à rotor bobiné. Elles sont toutes basées sur le principe de la commande vectorielle par orientation du flux en utilisant le système de Scherbius. Cette commande permet d'obtenir un facteur de puissance unitaire au stator [13]-[18]. Les fonctionnements dans les modes hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles.

L'utilisation du circuit équivalent de la machine en régime permanent permet d'avoir la meilleure compensation réactive possible, tout en abaissant au minimum la puissance requise pour le convertisseur [19].

Le contrôle direct des puissances active et réactive au stator (ou DPC, Direct Power Control) est une méthode qui semble très robuste car elle n'utilise que les mesures de courants et tensions réels pour calculer les puissances électriques au stator. Elle est indépendante des paramètres de la machine et ne nécessite pas de capteur de position du rotor. Son principe est identique à la commande DTC pour le fonctionnement moteur [20] et [21].

1.2 GENERATEURS ELECTRIQUES ET CONFIGURATIONS

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors il doit tourner à vitesse fixe [22]. Si la vitesse est très variable, le générateur est lié indirectement au réseau à travers un convertisseur de puissance. Ce type de chaîne permet d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

1.2.1 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE ASYNCHRONE

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en terme d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau (voir Fig.(1.1)) Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS [22]. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage au réseau .

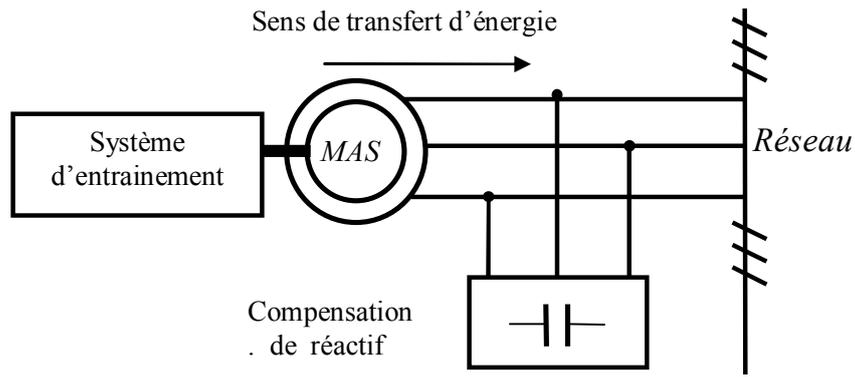


Fig. (1.1) Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. On dispose ainsi d'un générateur deux en un. Cette disposition est par exemple utilisée sur certaines éoliennes de manière à proposer deux régimes de rotation, l'un rapide en journée, l'autre plus lent pour la nuit, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable. Le dispositif de base est représenté sur la Figure (1.2).

Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité par cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure [23].

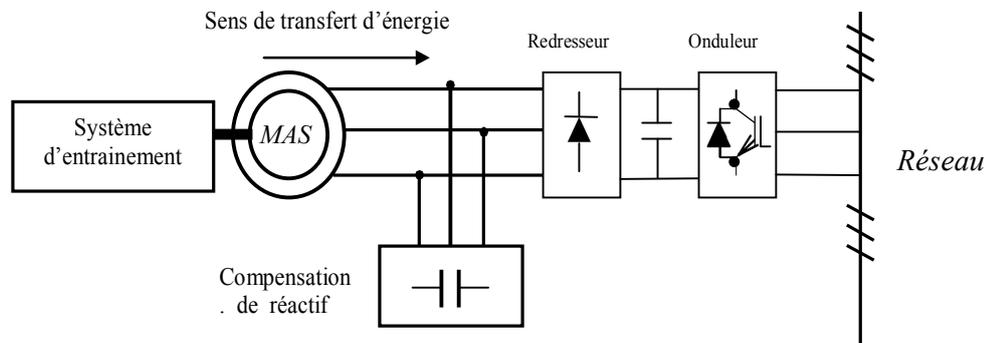


Fig.(1.2) Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau

1.2.2 MACHINE ASYNCHRONE A ROTOR BOBINE ET DOUBLE ALIMENTATION (MADA)

Comme c'est le cas pour un stator classique, les machines asynchrones à rotor bobiné ont des enroulements logés dans des encoches. Les courants rotoriques circulent via des anneaux qui glissent contre des balais généralement en carbone montés sur le châssis du générateur (voir Fig.(1.3)). Contrairement aux machines à cage directement connectées au réseau, les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système.

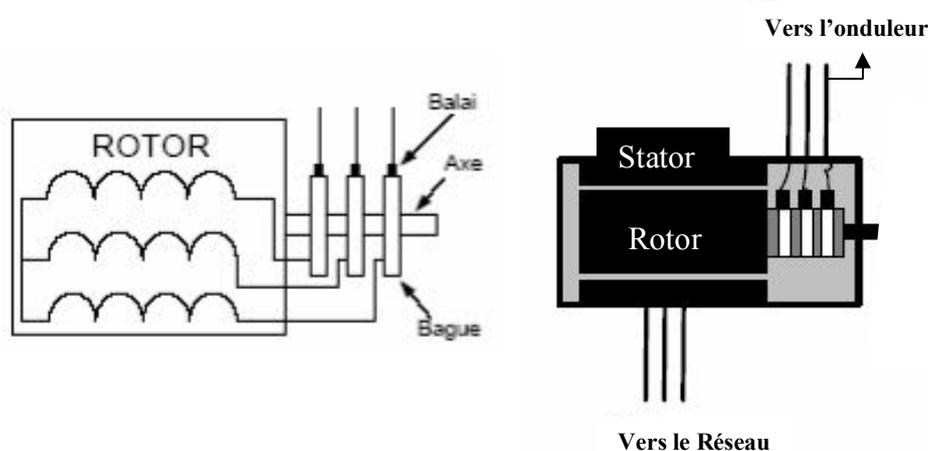


Fig. (1.3) Machine à induction à rotor bobiné

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont 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.

A. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

La Figure (1.4) montre la configuration qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance du rotor. Outre, la plage de variation de vitesse est limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs diminue le rendement du système de conversion [24].

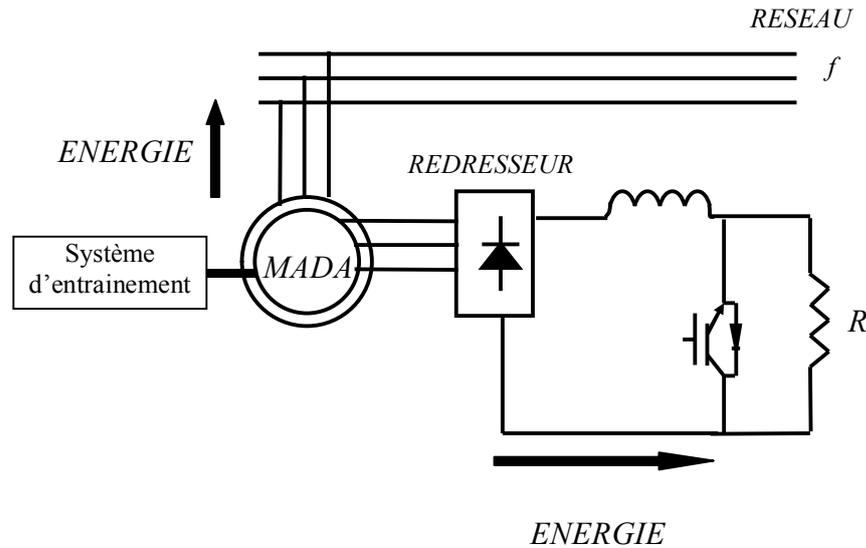


Fig.(1.4) MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Le convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (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 [25]. Puisque le convertisseur statique doit seulement gérer 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* réalise 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 hyper synchrone [26].

B. MADA – structure de Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (voir Fig.(1.5)). 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 [27].

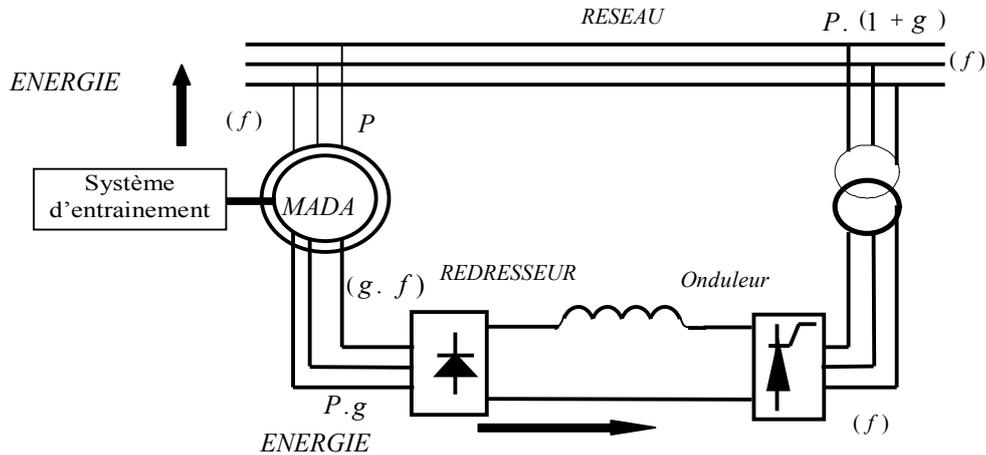


Fig. (1.5) Structure de Kramer

C. MADA – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (voir Fig.(1.6)), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [23]. 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.

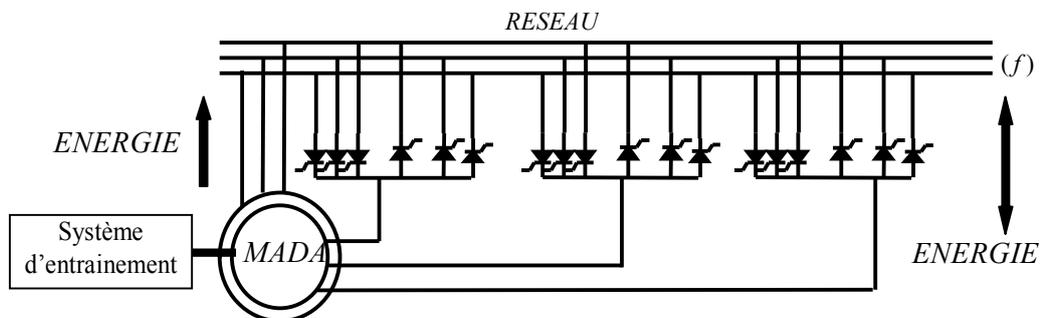


Fig. (1.6) Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

D. MADA – structure de Scherbius avec convertisseurs en cascades

La figure Fig.(1.7) montre une configuration avec la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) à la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA. C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble de deux convertisseurs à **IGBT** commandés en **MLI**, en cascade, est inséré afin de contrôler le flux et la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du coté de la machine et contrôle aussi des puissances actives et réactives transitées du coté du réseau.

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des surtensions importantes dans les enroulements rotoriques.

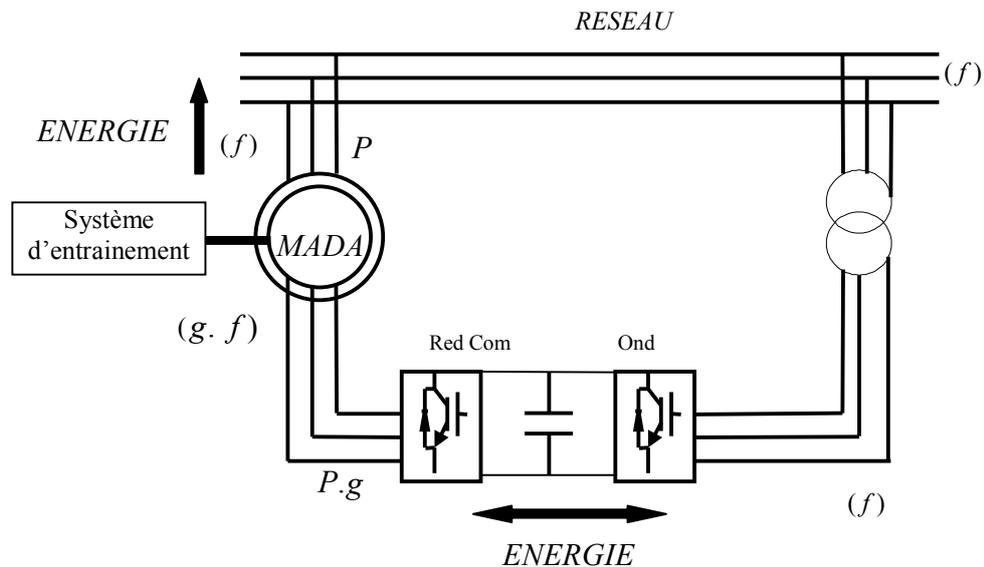


Fig. (1.7) Structure de Scherbius avec convertisseurs en cascades

1.2.3 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE SYNCHRONE

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité.

Les machines synchrones à rotor bobiné : font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [28].

Les machines synchrones à aimants permanents : Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS. Le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable. Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (voir Fig.(1.8)) [22]. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (*offshore* par exemple). La présence

obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

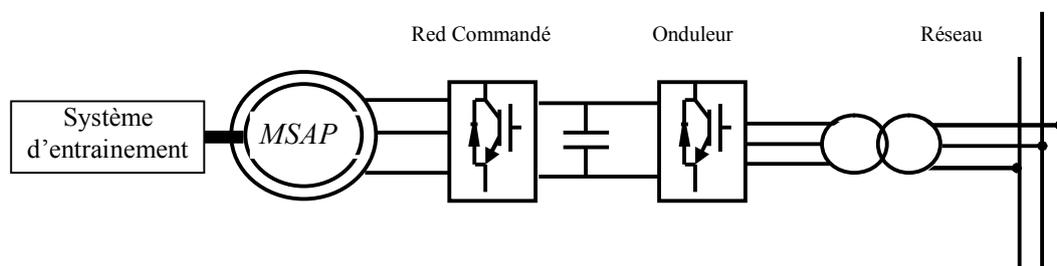


Fig. (1.8) Système basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Il existe plusieurs systèmes utilisant les machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

1.2.4 MACHINES A STRUCTURES SPECIALES

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable pure ou excitée. C'est leur potentiel de faible coût et de robustesse qui conduit à ces recherches. C'est des machines dédiées aux applications éoliennes ou des machines offrant des caractéristiques intéressantes pour la basse vitesse de rotation. On notera que malgré son potentiel, la MRV n'a pas encore trouvé son application dans l'éolien [17].

A. Machine à réluctance variable (MRV) pure

La structure de la MRV dite « pure » est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator. Pour un grand nombre de dents, les dents du stator sont regroupées en plots afin de faciliter le bobinage de la machine, on obtient alors une machine à plots dentés. Le principal avantage de cette structure est d'assurer un fonctionnement basse vitesse (grand nombre de dents) tout en conservant un bobinage réalisable en utilisant une MRV à plots dentés.

B. Machine à réluctance variable (MRV) excitée

Certaines MRV peuvent intégrer une excitation au rotor ou au stator. Cette excitation est effectuée par un circuit électrique d'excitation ou bien par des aimants permanents. Les

machines à aimants peuvent conduire à un gain en puissance contrebalançant le coût des aimants à une structure intégrant toujours une excitation [17].

1.3 LIMITES REACTIVES DES GENERATEURS

Il est bien connu que les générateurs ont une capacité de puissance active maximale à ne pas dépassé, ainsi qu'une plage de puissance réactive limitée.

Figures (1.9) représente la courbe de la capacité réactive d'une génératrice synchrone avec l'hypothèse que la tension à ces bornes est constante. Elle montre que, si le générateur est utilisé à un facteur de puissance en dessous de sa valeur nominale, le domaine de chauffage limite est en fait dépassé, donc, l'engagement de coûts, anormalement, plus la dissipation de la chaleur que son fonctionnement normal au régime nominal du facteur de puissance. En principe, au régime nominal du facteur de puissance (0,8), la puissance réactive est toujours dans la bonne proportion avec la puissance apparente, et le chauffage est encore dans la plage autorisé.

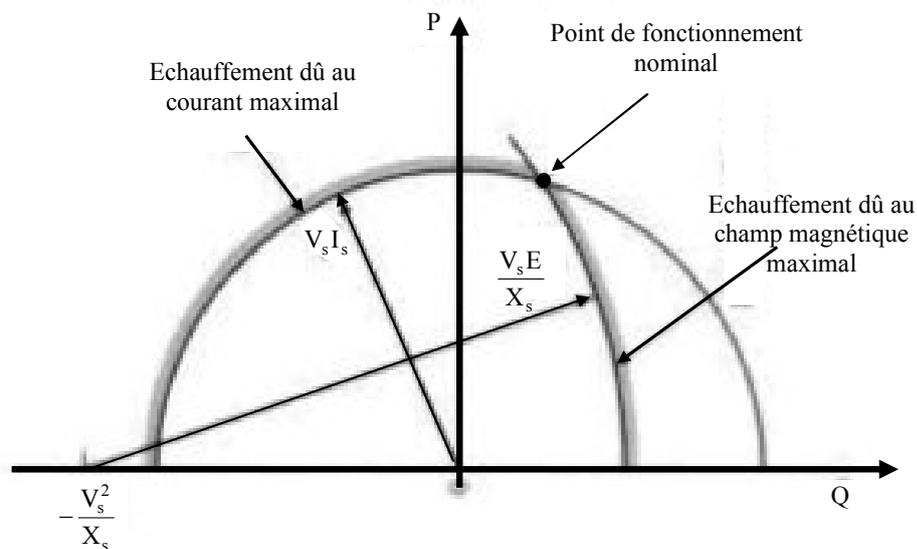


Fig. (1.9) Courbe limite de la capacité réactive d'un générateur synchrone

La capacité maximale de puissance réactive correspond à la puissance réactive maximum que le générateur peut produire en fonctionnant avec un facteur de puissance "AV". La capacité minimale de puissance réactive correspond à la puissance réactive maximum que le générateur peut absorber en fonctionnant avec un facteur de puissance "AR". Ces limitations sont une fonction de la puissance active du générateur, c.-à-d., à mesure que la vraie puissance augmente, les limitations de puissance réactive diminuent.

La figure (1.10) représente une courbe typique de la capacité d'un générateur, qui montre les limitations des puissances actives et réactives.

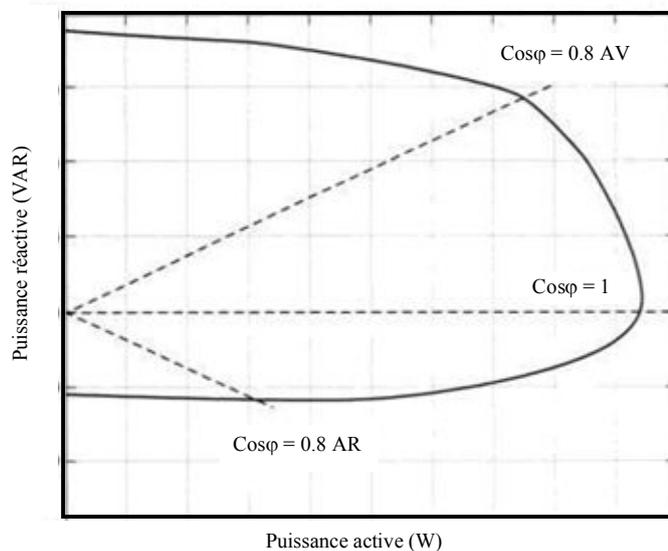


Fig. (1.10) Courbe typique de la capacité réactive d'un générateur synchrone

1.4 CONCLUSION

Une brève description du gisement éolien, a été présentée dans ce chapitre. Quelques notions principales sur les différents types d'éoliennes dans le contexte de la génération électrique mais cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. Nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne et les principales techniques adoptées pour la régulation de la puissance aérodynamique recueillie par la turbine (le calage variable ou le décrochage aérodynamique).

La seconde partie du chapitre présente quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne : présence ou absence de multiplicateur de vitesse, génératrice asynchrone, génératrice synchrone, génératrice à réluctance variable. Puis nous avons établi une étude sur les deux grandes familles d'éolienne existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. Le fonctionnement à vitesse variable utilisant une MADA, dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau électrique triphasé, tandis que les enroulements rotoriques sont connectés à un onduleur de tension qui permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs

à transistors IGBT plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance régulier.

Pour le fonctionnement à vitesse fixe, la génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie d'origine éolienne. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire. On distingue plusieurs utilisations: tout d'abord l'alimentation des sites non raccordés au réseau de façon autonome sur des charges isolées qui correspondent à des machines asynchrones à cage d'écureuil auto-excités par un banc de condensateurs assurant sa magnétisation sont de quelques watts à quelques kilowatts. C'est ce point qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA GENERATRICE A INDUCTION DOUBLE ALIMENTEE « GIDA »

2.1. INTRODUCTION

A travers ce chapitre, nous essayons d'aborder la modélisation de la GIDA, en générateur. Ceci a pour objectif de comprendre le comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement, éventuellement lors de son contrôle (commande). Le modèle de la GIDA est développé en utilisant les représentations vectorielles complexes afin d'obtenir un modèle simple [29], [30] et [31]. Les résultats de cette modélisation seront réalisés par simulation numérique sur une machine de 4 kW (voir Annexe).

2.2 MODELISATION VECTORIELLE DE LA GADA

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine à induction triphasé symétrique à rotor bobiné. La machine à induction se compose principalement de deux parties, *stator* (Fig 2.1) et *rotor* (Fig 2.2). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par *un enterfer*.

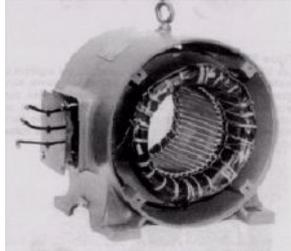


Fig. (2.1) Stator du moteur à induction

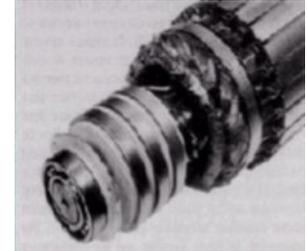


Fig. (2.2) Rotor bobiné

En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator A, B et C sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre (Fig 2.3).

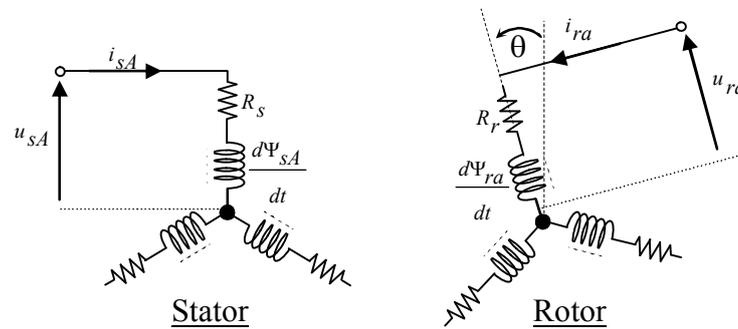


Fig. (2.3) Modèle dynamique dans une DFIM à trois axes

Souvent la machine est construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de 120°. Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite.

Chaque enroulement des deux armatures est parcouru par un système de courant équilibré :

$$i_{k(s,r)} = i_M (s,r) \cos\left(\omega_{(s,r)} t - \frac{2(k-1)\pi}{3}\right) \quad (2.1)$$

i_M : Valeur maximale est égale à $i_{eff} \sqrt{2}$

$k = 1, 2, 3$; Indices des phases A $\rightarrow k=1$, B $\rightarrow k=2$ et C $\rightarrow k=3$

$\omega_{(s,r)}$: Pulsation du stator ou du rotor.

Les équations de tensions des circuits rotorique et statorique (la loi de Lenz associée à la loi d'Ohm) [32]-[37], voir Fig. (2. 3). Dès lors, on peut écrire:

$$\begin{aligned}\bar{u}_{sA} &= R_s \bar{i}_{sA} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{sA} \\ \bar{u}_{sB} &= R_s \bar{i}_{sB} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{sB} \\ \bar{u}_{sC} &= R_s \bar{i}_{sC} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{sC}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Où R_s est la résistance des enroulements du stator, et les équations équivalentes pour des enroulements du rotor seront à leurs tours comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{u}_{rA} &= R_r \bar{i}_{rA} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{rA} \\ \bar{u}_{rB} &= R_r \bar{i}_{rB} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{rB} \\ \bar{u}_{rC} &= R_r \bar{i}_{rC} + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_{rC}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Où R_r , est la résistance des enroulements du rotor.

Un vecteur triphasé $[x] = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^t$ peut être représenté vectoriellement par un vecteur \bar{x} , appelé phaseur. On peut généraliser la notion du phaseur sur toutes les grandeurs électriques courant, tension ou flux. Alors on écrira pour \bar{x} quelconque :

$$\bar{x} = x e^{j\zeta} = x_1 + a x_2 + a^2 x_3 \quad (2.4)$$

Avec :

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ et } 1 + a + a^2 = 0$$

Par adoption de l'expression (2.4), on passe du concept tension, courant et flux de phases à celui du concept tension, courant et flux d'armature d'où (2.3) et (2.4) seront données comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{u}_s^{(s)} &= R_s \bar{i}_s^{(s)} + \frac{d\bar{\phi}_s^{(s)}}{dt} \\ \bar{u}_r^{(r)} &= R_r \bar{i}_r^{(r)} + \frac{d\bar{\phi}_r^{(r)}}{dt}\end{aligned}\quad (2.5)$$

Les relations du flux embrassé dans chacune des deux armatures sont données comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{\phi}_s^{(s)} &= L_s \bar{i}_s^{(s)} + M \bar{i}_r^{(r)} e^{j\theta} \\ \bar{\phi}_r^{(r)} &= L_r \bar{i}_r^{(r)} + M \bar{i}_s^{(s)} e^{-j\theta}\end{aligned}\quad (2.6)$$

$(s), (r)$: indices exposants indiquant le référentiel de mesure propre à chaque armature
s \rightarrow stator ; r \rightarrow rotor.

En utilisant (2.5) et (2.6), on obtient :

$$\begin{aligned}\bar{u}_s^{(s)} &= R_s \bar{i}_s^{(s)} + L_s \frac{d\bar{i}_s^{(s)}}{dt} + M \frac{d}{dt} (\bar{i}_r^{(r)} e^{j\theta}) \\ \bar{u}_r^{(r)} &= R_r \bar{i}_r^{(r)} + L_r \frac{d\bar{i}_r^{(r)}}{dt} + M \frac{d}{dt} (\bar{i}_s^{(s)} e^{-j\theta})\end{aligned}\quad (2.7)$$

Les relations (2.7) définissent le modèle électromagnétique vectoriel complexe de la machine asynchrone double excitation dans des référentiels séparés, i.e la mesure de chaque grandeur est réalisée dans son propre référentiel.

Les équations vectorielles et différentielles de (2.6) et (2.7) représentent l'interaction électromagnétique de la machine à induction à double alimentation symétrique que ce soit en régime permanent ou en transitoire. Elles doivent être complétées par les équations des puissances actives et réactives des deux armatures.

Les puissances au stator peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned}P_s &= \Re(\bar{u}_s \otimes \bar{i}_s^*) \\ Q_s &= \Im(\bar{u}_s \otimes \bar{i}_s^*)\end{aligned}\quad (2.8)$$

Les puissances au rotor sont données comme suit ::

$$\begin{aligned}P_r &= \Re(\bar{u}_r \otimes \bar{i}_r^*) \\ Q_r &= \Im(\bar{u}_r \otimes \bar{i}_r^*)\end{aligned}\quad (2.9)$$

2.3 REFERENTIELS D'OBSERVATIONS

D'habitude la modélisation des machines est faite dans un référentiel appelé référentiel commun d'observation T_{obs} dans lequel toutes les variables doivent y être rapportées. A cette fin, des relations de passage entre référentiels sont définies.

2.3.1 RELATION DE PASSAGE ENTRE REFERENTIELS

Sachant que la norme de \bar{x} , définie par x est invariante quelque soient les repères en rotation, on peut écrire les relations suivantes, voir Fig. (2.4) :

$$\bar{x}^{(s)} = x.e^{j\theta_s} ; \bar{x}^{(r)} = x.e^{j\theta_r} ; \bar{x}^{(T)} = x.e^{j\theta_T} \quad (2.10)$$

avec (s), (r) et (T) définissent les indices respectivement dans les repères du stator, du rotor et du repère tournant. Les rapports entre les différentes relations (2.10) permet de donner les relations de passage typique entre repères tels que :

- Passage stator–rotor et réciproquement, rapport $x^{(s)} / x^{(r)}$ de (2.10)

$$\bar{x}_r^{(s)} = \bar{x}_r^{(r)} .e^{j\theta} \text{ ou } \bar{x}_s^{(r)} = \bar{x}_s^{(s)} .e^{-j\theta} \quad (2.11)$$

- Passage stator– T_{obs} et réciproquement, rapport $x^{(s)} / x^{(T)}$

$$\bar{x}^{(s)} = \bar{x}^{(T)} .e^{j\theta_{obs}} \text{ ou } \bar{x}^{(T)} = \bar{x}^{(s)} .e^{-j\theta_{obs}} \quad (2.12)$$

- Passage rotor– T_{obs} et réciproquement, rapport $x^{(r)} / x^{(T)}$

$$\bar{x}^{(r)} = \bar{x}^{(T)} .e^{j(\theta_{obs}-\theta)} \text{ ou } \bar{x}^{(T)} = \bar{x}^{(r)} .e^{-j(\theta_{obs}-\theta)} \quad (2.13)$$

2.3.2 EQUATIONS DES TENSIONS

Pour écrire les expressions de (2.5) dans le référentiel commun d'observation, il suffit d'utiliser les relations de passage (2.12) et (2.13), il vient alors:

$$\bar{u}_s = R_s . \bar{i}_s + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + j . \omega_{obs} . \bar{\phi}_s \quad (2.14)$$

$$\bar{u}_r = R_r . \bar{i}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + j . (\omega_{obs} - \omega) . \bar{\phi}_r$$

2.3.3 EQUATIONS DES FLUX

Les relations rigides flux–courant dans le référentiel commun seront à leurs tours données comme

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_s &= L_s . \bar{i}_s + M . \bar{i}_r \\ \bar{\phi}_r &= L_r . \bar{i}_r + M . \bar{i}_s \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.3.4 CHOIX DU REFERENTIEL COMMUN

L'étude analytique de la machine asynchrone à l'aide des composantes 2D, nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions vectorielles (2.14) et (2.15). Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes (D, Q) qui se

fait en fonction de l'application, voir Fig.(2.4), les trois cas souvent rencontrés sont les suivants :

- Référentiel commun lié au stator $\omega_{obs} = 0$;
- Référentiel commun lié au rotor $\omega_{obs} = \omega = p.\Omega$;
- Référentiel commun lié au synchronisme statorique $\omega_{obs} = \omega_s$; $\omega_r = (\omega_s - \omega)$

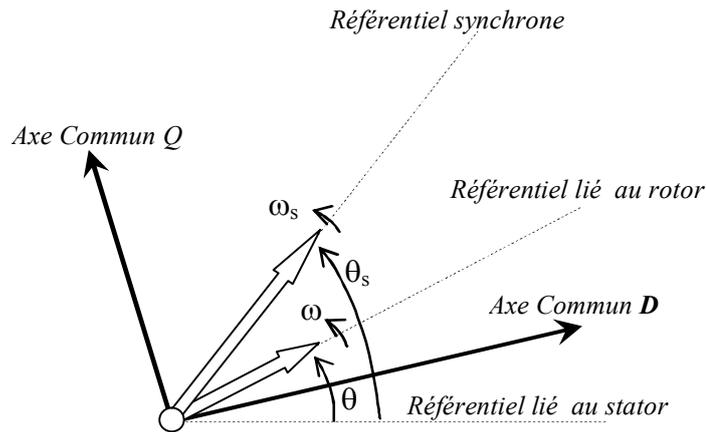


Fig. (2.4) Choix du référentiel dans un système d'axes commun

2.4 MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA GIDA

Les équations vectorielles des tensions statorique et rotorique, présentées en notation complexe, d'une machine à induction sont données par le système (2.7). La figure (2.5) illustre le schéma équivalent de la machine double alimentée pour un éventuel fonctionnement en générateur.

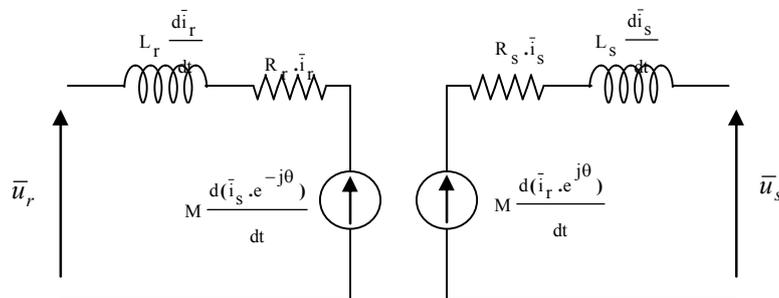


Fig. (2.5) Schéma équivalent la DFIG (coulée au réseau)

Pour les applications de la *DFIM* en générateur, i.e. *DFIG*, le réseau impose sa tension et sa fréquence (V_s, f_s) (génératrice non autonome), la tension du rotor aura pour rôle le contrôle du flux des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du côté du stator.

2.4.1 GIDA AUTONOME

L'adoption des conventions "*générateur*" au stator et "*récepteur*" au rotor donne lieu au changement de signe sur les courants tels que :

$$\begin{aligned} \bar{i}_s &\rightarrow -\bar{i}_s : \text{générateur} \\ \bar{i}_r &\rightarrow \bar{i}_r : \text{récepteur} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Si \bar{u}_r est une tension de commande, \bar{u}_s , \bar{i}_s et \bar{i}_r apparaissent comme variables d'état. Le système (2.14) avec la condition (2.16) ne peut admettre une solution déterminée car le nombre de variables est supérieur au nombre d'équations. Ainsi, l'équation de la charge (2.17) enlève cette indétermination. Les paramètres R, L et C de la charge sont indexés par l'indice *charge*.

$$\bar{u}_s = R_{charge} \bar{i}_s + L_{charge} \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \frac{1}{C_{charge}} \int \bar{i}_s \cdot dt \quad (2.17)$$

La fréquence de la tension induite au stator est donnée par :

$$f_s = \frac{p\Omega}{2\pi} \pm f_r \quad (2.18)$$

2.4.2 GIDA NON AUTONOME

On peut représenter le système dans le schéma de la figure (2.6), avec la mention que le réseau est un réseau infini, ce qui permettra à la machine de fonctionner à tension et fréquence statorique fixes. Ainsi la machine fonctionnera à un flux constant. La puissance mécanique est convertie en puissance électrique au stator, alors la GIDA débite sur le réseau.

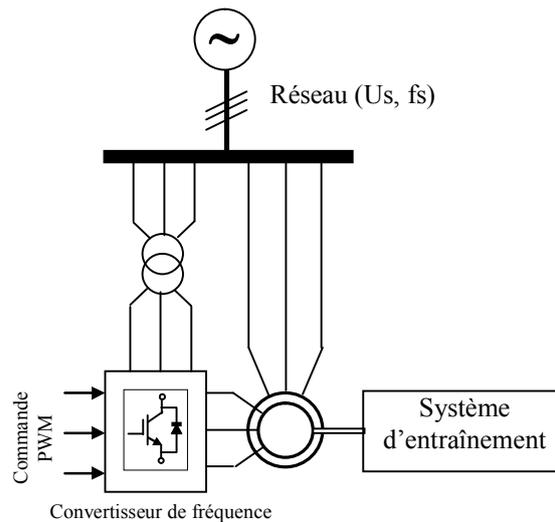


Fig.(2.6) Schéma représentant le fonctionnement non autonome du GIDA.

La simulation a été réalisée dans les conditions suivantes :

- Le stator est couplé directement à un réseau infini d'une tension et fréquence constante (**220V, 50Hz**).
- L'alimentation du rotor est assurée par un convertisseur de fréquence dont la tension est réglable en amplitude et en fréquence.
- La fréquence de la tension du rotor (f_r) est déduite de l'équation de l'autopilotage (2.18) en imposant une fréquence $f_s=50$.

2.4.3 SIMULATION DE LA GIDA COUPLEE AU RESEAU

La figure (2.7) illustre l'amplitude de la tension imposée au rotor de la GIDA pour deux modes de fonctionnement : 1- hypo-synchrone (125 rd/s)

2- hyper-synchrone (188rd/s).

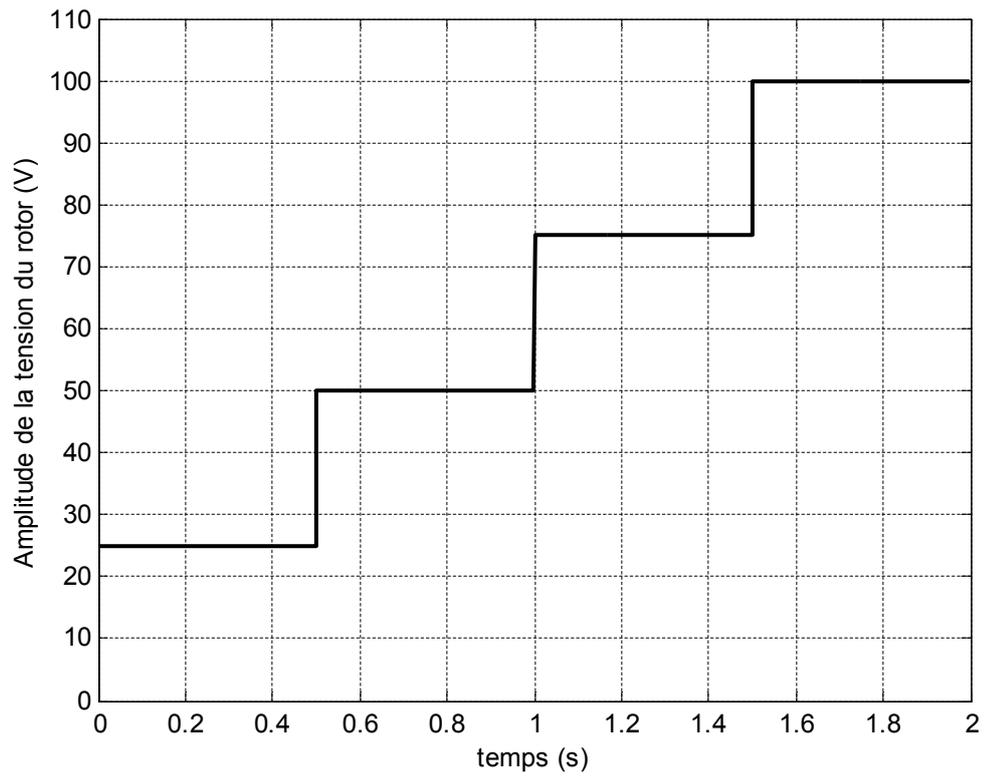


Fig.(2.7) Profil de l'amplitude de la tension du rotor imposée à la GIDA

Résultats de simulation

1. Fonctionnement, hypo-synchrone

Les figures de (2.8) à (2.13) illustrent, respectivement, la puissance active et la puissance réactive du stator, la puissance active et la puissance réactive du rotor, le courant d'une phase du stator et le courant d'une phase du rotor. Ces résultats sont donnés pour les mêmes conditions que précédemment (vitesse 125rd/s).

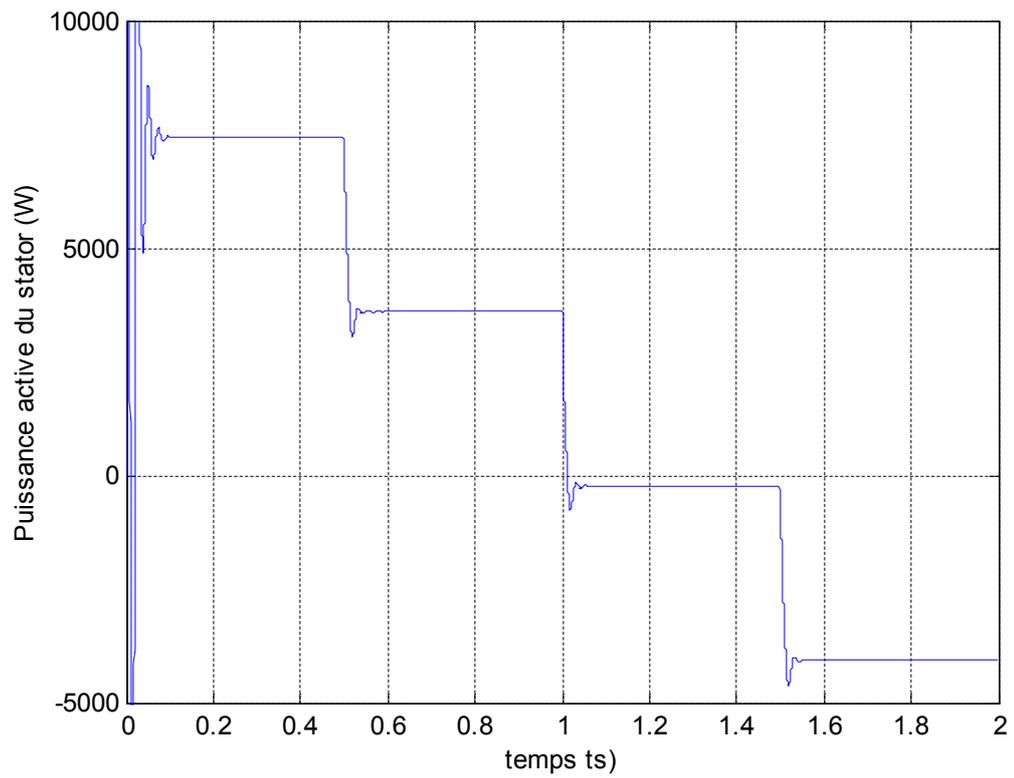


Fig.(2.8) Puissance active du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

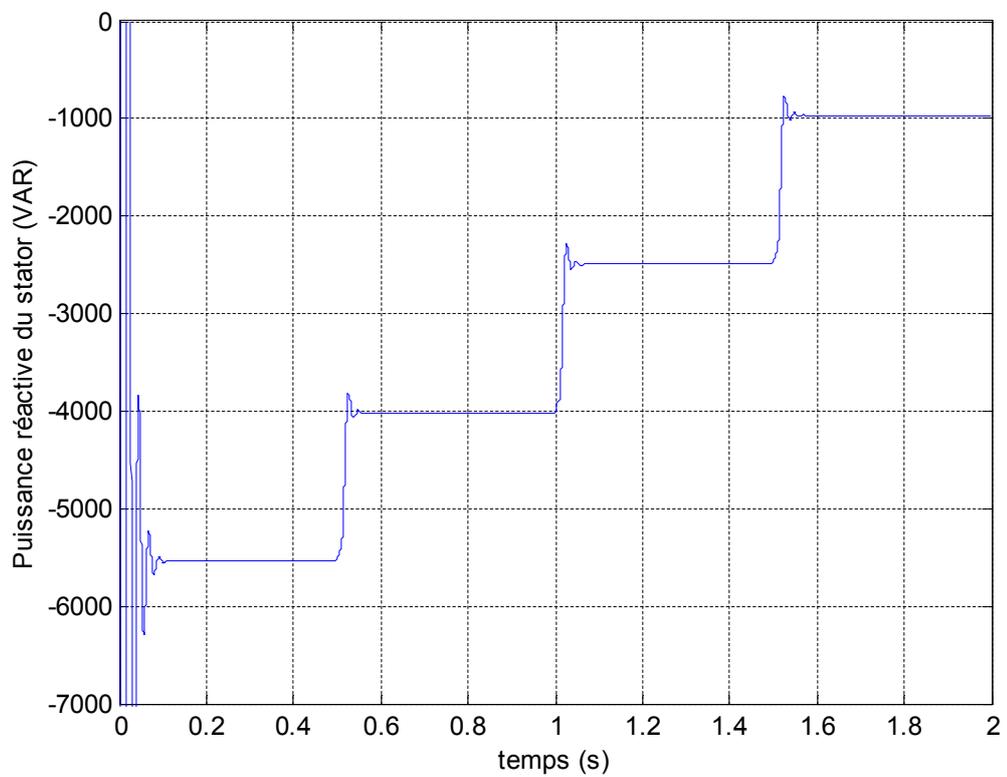


Fig.(2.9) Puissance réactive du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

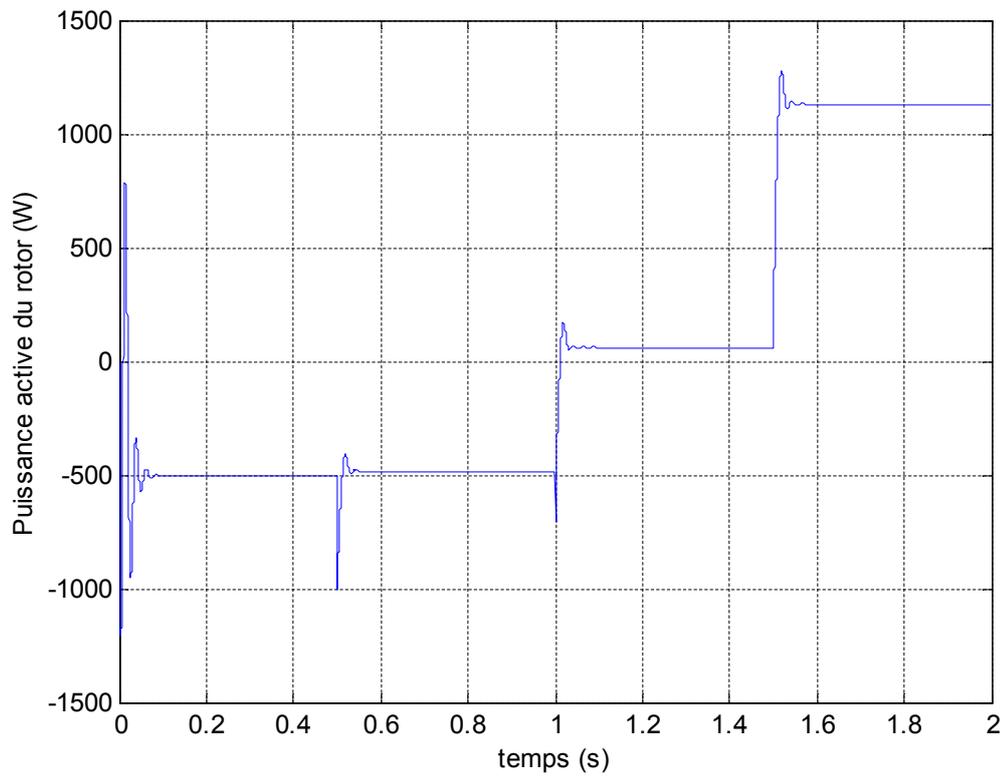


Fig.(2.10) Puissance active du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

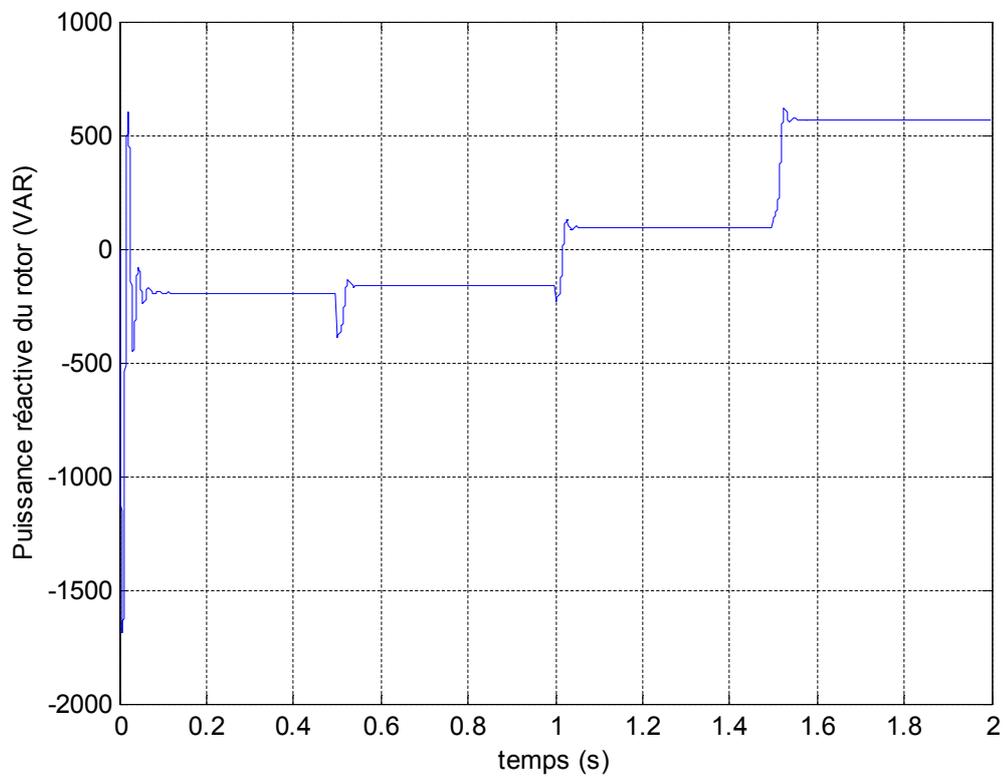


Fig.(2.11) Puissance réactive du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

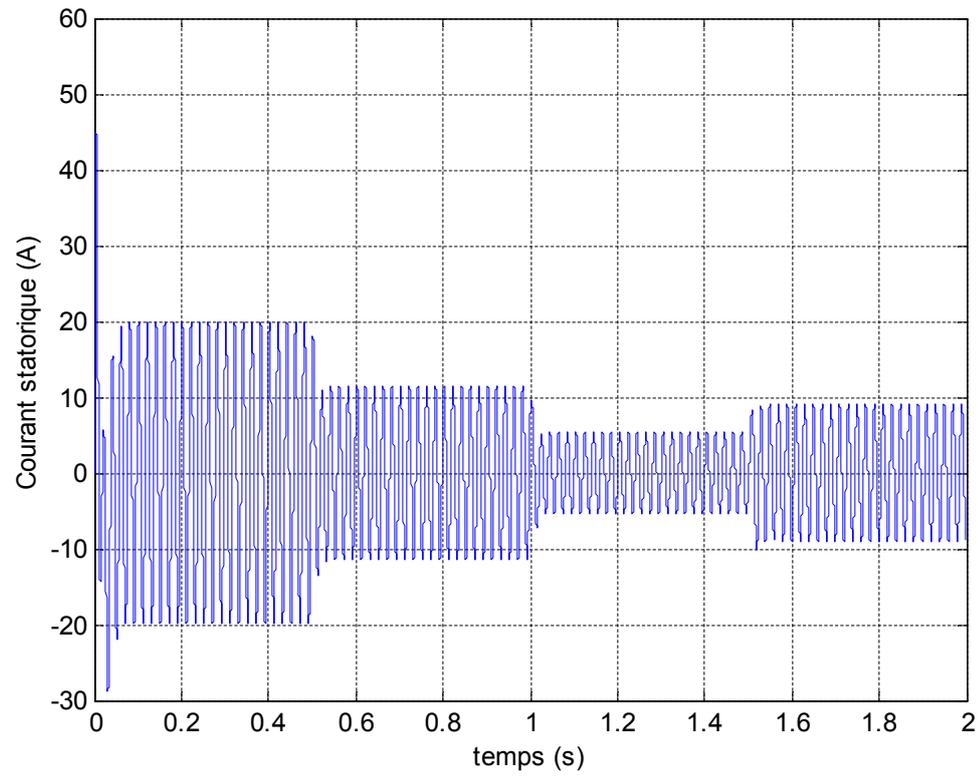


Fig.(2.12) Courant du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

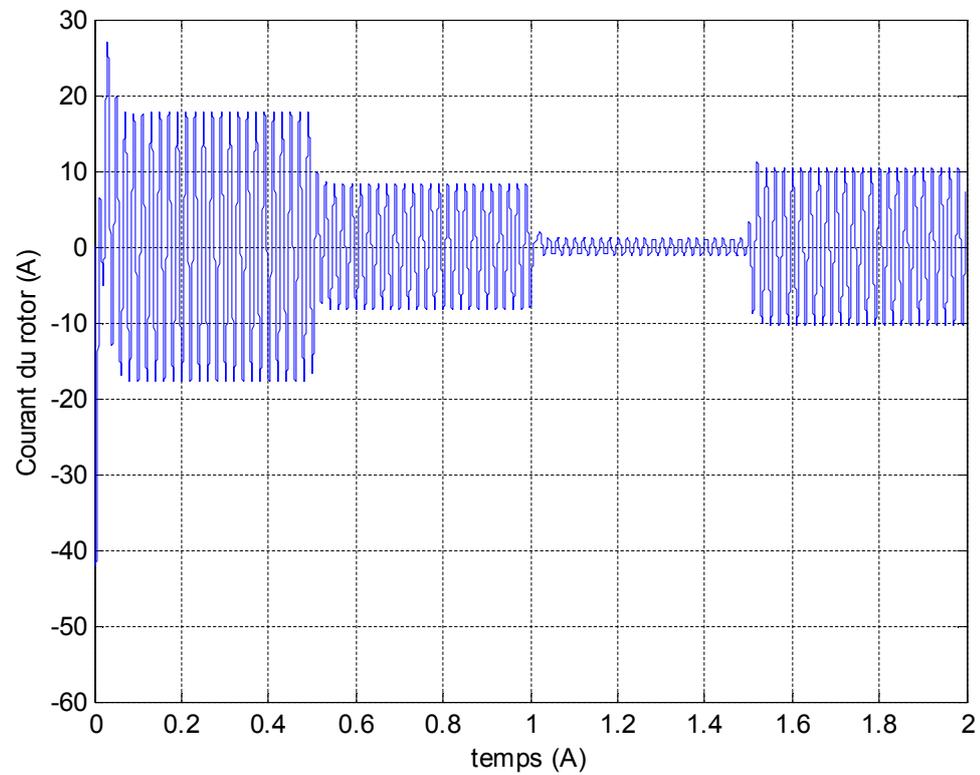


Fig.(2.13) Courant du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

2. Fonctionnement, hyper-synchrone

Les figures de (2.14) à (2.19) illustrent, respectivement, la puissance active et la puissance réactive du stator, la puissance active et la puissance réactive du rotor, le courant d'une phase du stator et le courant d'une phase du rotor. Ces résultats sont donnés pour les mêmes conditions que précédemment (vitesse 188rd/s).

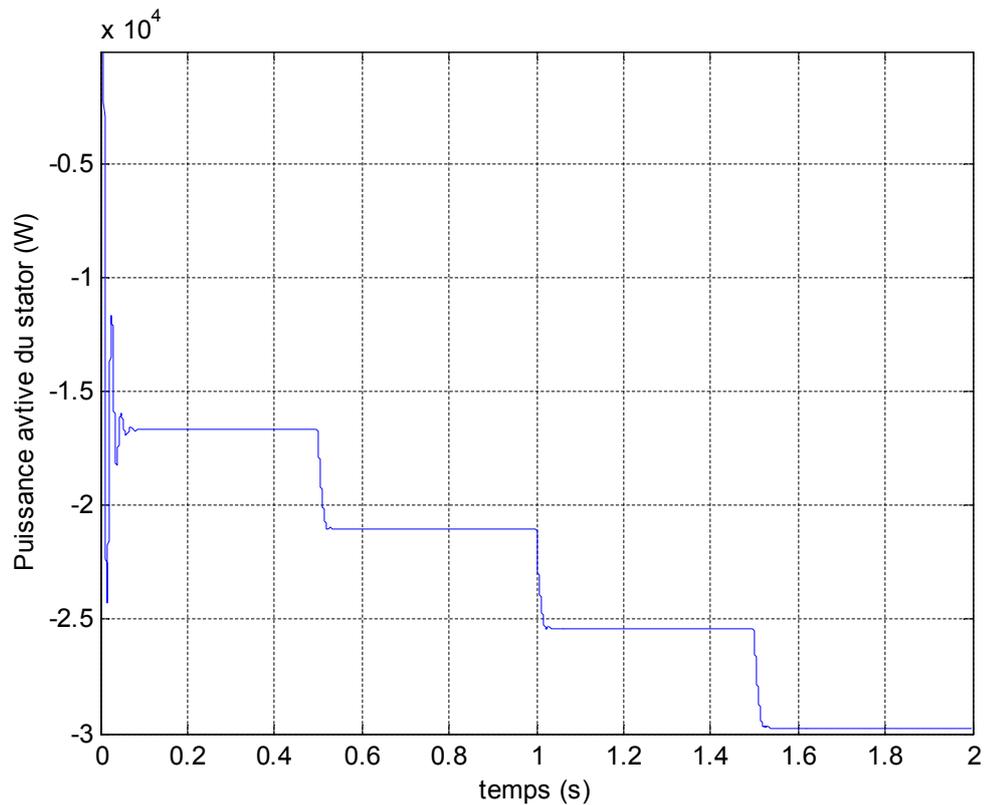


Fig.(2.14) Puissance active du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

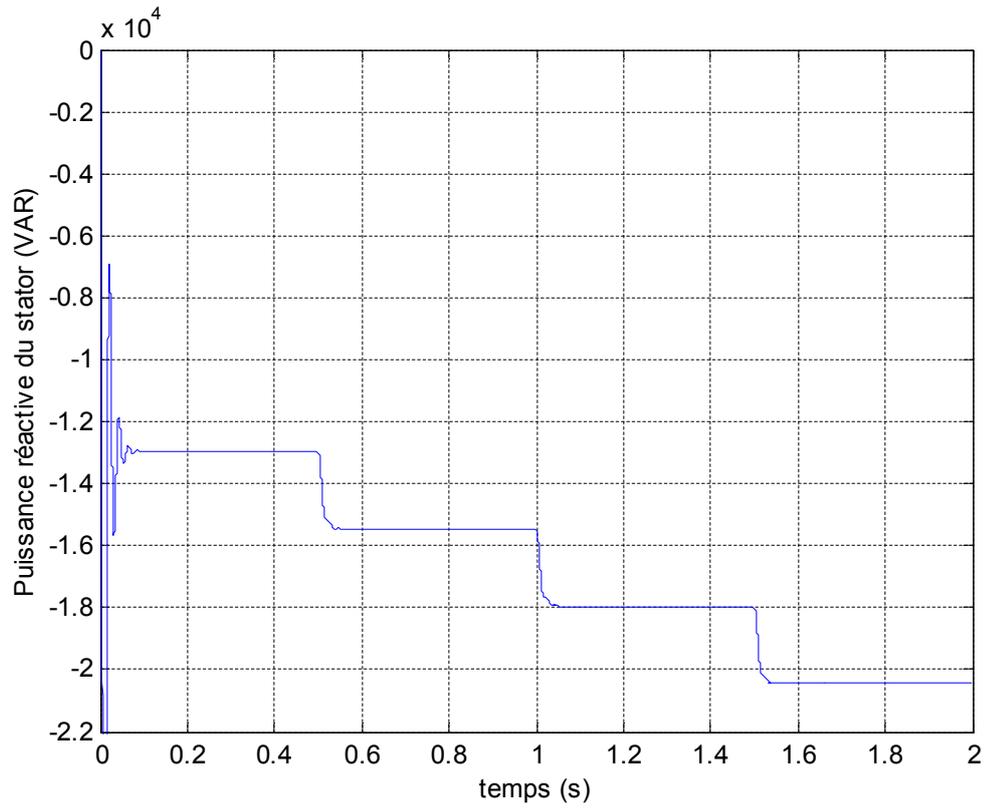


Fig.(2.15) Puissance réactive du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

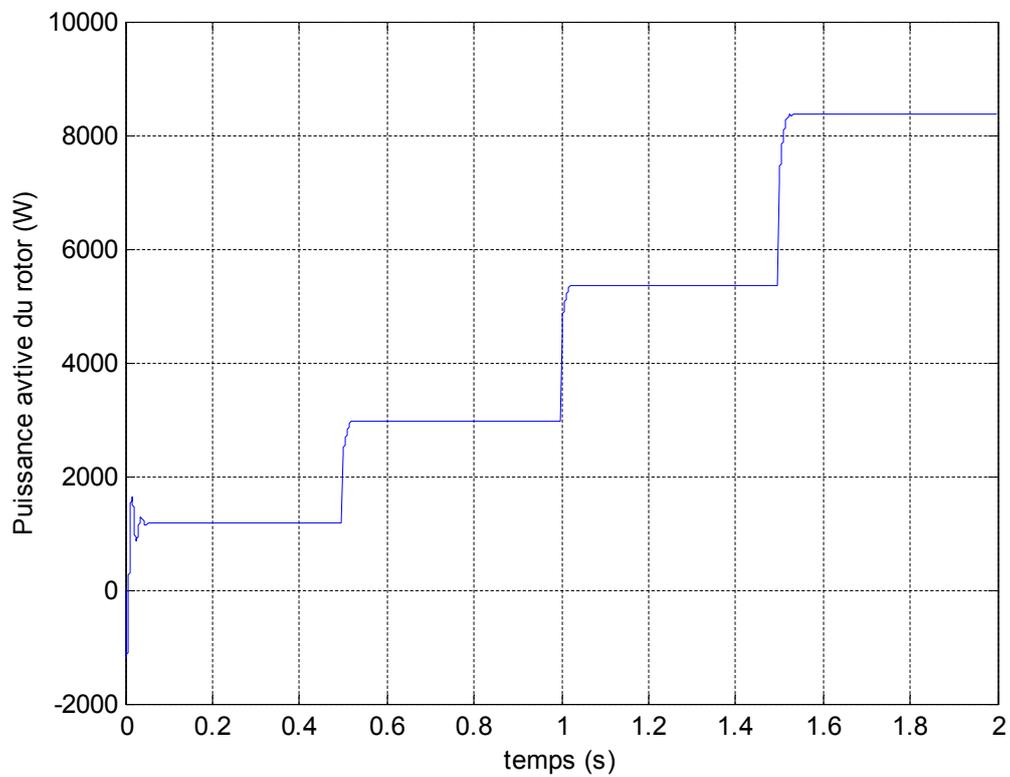


Fig.(2.16) Puissance active du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

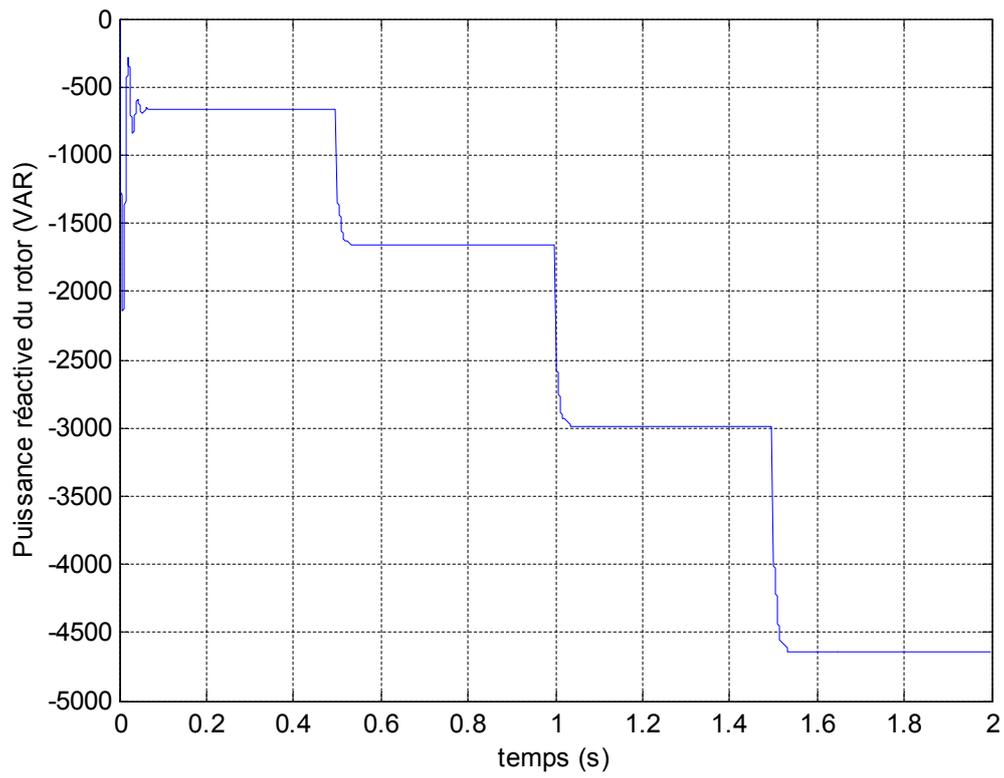


Fig.(2.17) Puissance réactive du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

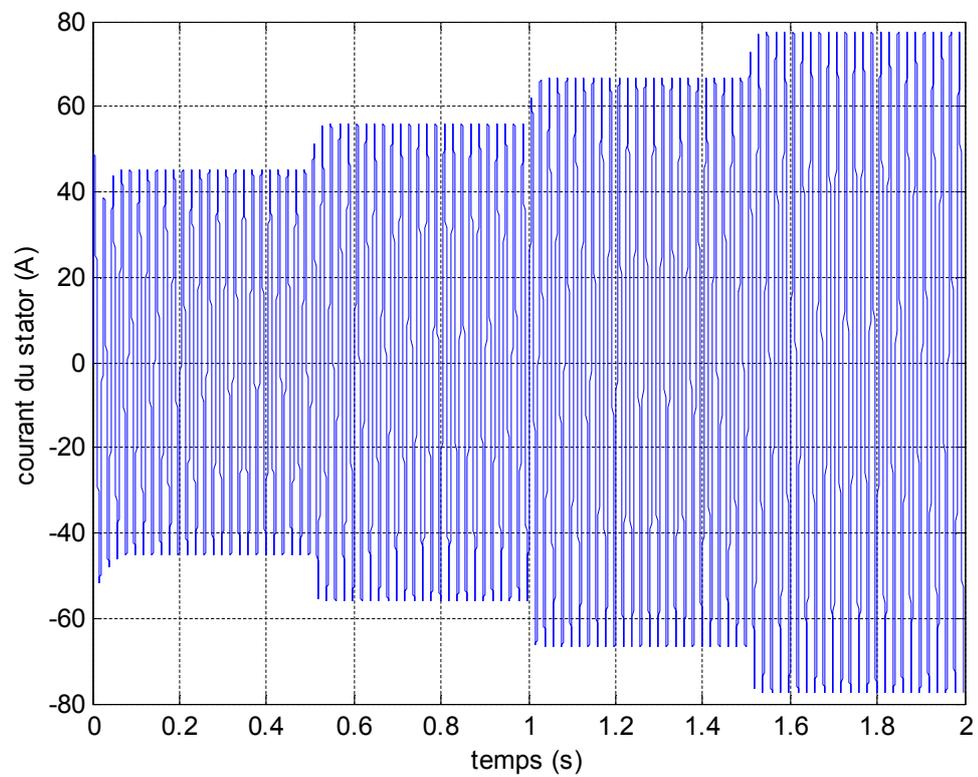


Fig.(2.18) Courant du stator pour différentes amplitudes de la tension rotorique

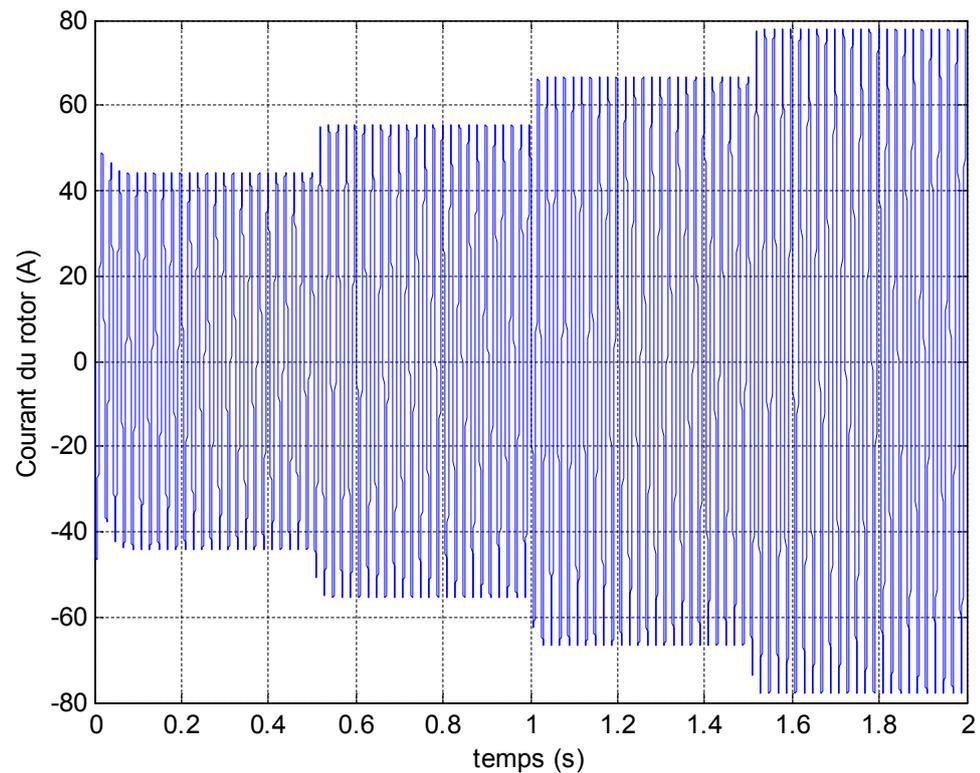


Fig.(2.19) Courant du rotor pour différentes amplitudes de la tension rotorique

2.4.4 DISCUSSIONS DES RESULTATS

La simulation du modèle montre clairement les capacités de la GIDA à fonctionner en régime génératrice couplée sur un réseau infini dans les régimes hypo- hypersynchrone. Les résultats indiquent que l'amplitude de tension du rotor influe directement sur la stabilité de la machine et sur l'écoulement des puissances.

2.5 CONCLUSION

Comme conclusion on peut dire que le fonctionnement naturel de la MADA est donné par la contribution des deux armatures statorique et rotorique alimentées par deux sources de courants alternatifs. Ces dernières fournissent à la fois l'excitation pour la magnétisation de la machine en termes d'énergie réactive et la puissance active pour le développement du couple dans la phase de motorisation et la puissance électrique dans celle de génération. En double excitation, la rotation de champs tournants du stator et du rotor devient fonction des fréquences respectivement imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée afin de garantir une stabilité à

la machine. Par analogie, on est donc en présence du problème de stabilité de la machine synchrone. En effet, les fréquences imposées par les deux sources externes confèrent à la machine asynchrone double alimentée une vitesse constante comme le cas de la machine synchrone. Par conséquent, sans le recours au contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine, le risque d'instabilité devient imminent.

CHAPITRE 3

**COMMANDE VECTORIELLE DE LA GENERATRICE A
INDUCTION DOUBLE ALIMENTEE****3.1 INTRODUCTION**

La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Pour le cas du contrôle vectoriel de la DFIG, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est callé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du coté du stator (convention

générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur).

3.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE A FLUX ORIENTE

Dans ce travail, il sera exposé le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la GIDA. Ainsi, comme il est montré dans la figure (3.1), le flux sera callé sur l'axe d et la tension du stator sur l'axe q , cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié.

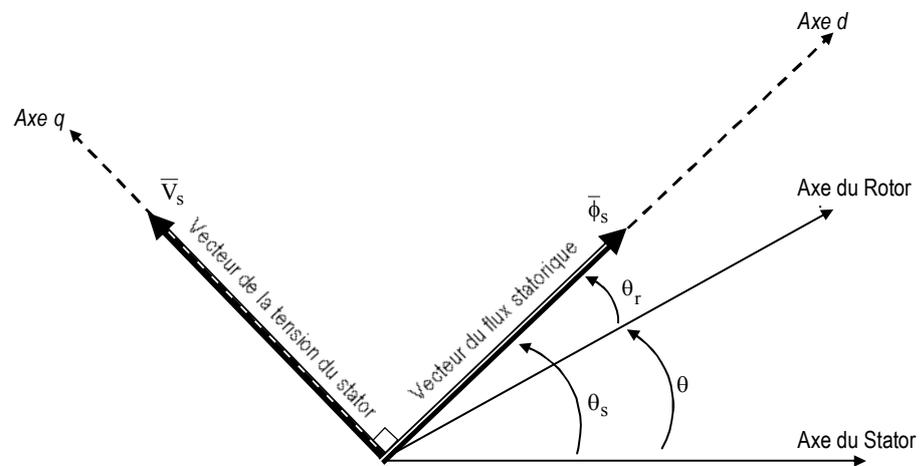


Fig. (3.1) Orientation du flux statorique.

3.3 APPLICATION DE LA COMMANDE VECTORIELLE A LA GIDA

Le modèle biphasé équivalent de la GIDA exprimé dans le référentiel (d,q) est donné par le système d'équations différentielles suivant:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\
 V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Avec:

$$\begin{aligned}
\phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\
\phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \\
\phi_{rd} &= L_r i_{rd} + M i_{sd} \\
\phi_{rq} &= L_r i_{rq} + M i_{sq}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Les puissances active et réactive du coté statorique sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{aligned}
P &= \Re(\overline{V_s} i_s^*) = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\
Q &= \Im(\overline{V_s} i_s^*) = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

La contrainte d'orientation du flux statorique permet d'écrire $\phi_{qs} = 0$ et $\phi_{ds} = \phi_s$ (avec l'hypothèse d'un flux statorique constant). Ainsi à partir de (3.2), on obtient les expressions suivantes

$$\begin{aligned}
i_{sd} &= -\frac{M}{L_s} i_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\
i_{sq} &= -\frac{M}{L_s} i_{rq}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Si l'on néglige la résistance du stator, ce qui est une hypothèse valable pour les machines de moyennes et grandes puissances utilisées dans l'énergie éolienne [28]. En tenant compte de l'orientation du flux et de la tension du stator (valeur constante, imposé par le réseau) selon la figure (3.1), on peut récrire d'après les deux premières équations du système (3.1) ce qui suit:

$$\begin{aligned}
V_{sd} &= \frac{d\phi_s}{dt} = 0 \\
V_{sq} &= \omega_s \phi_s = V_s
\end{aligned} \tag{3.5}$$

D'où

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \tag{3.6}$$

En injectant (3.6) dans (3.2), on aura

$$\begin{aligned}\phi_{rd} &= L_r \sigma I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} &= L_r \sigma I_{rq}\end{aligned}\quad (3.7)$$

En remplaçant les expressions (3.5) et (3.6) dans (3.3), on obtient

$$\begin{aligned}P_s &= -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s &= -V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} + V_s \frac{\phi_s}{L_s} = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Il ressort de l'expression (3.8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. La puissance active au stator produite par la machine est contrôlée par la composante i_{qr} . Si la tension et la fréquence sont imposées par le réseau, la puissance réactive peut être contrôlée par la composante i_{dr} et éventuellement contrôlée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire au stator.

En remplaçant (3.7) dans les expressions des tensions rotoriques dans le système d'équations (3.1) on a:

$$\begin{aligned}V_{rd} &= R_r i_{rd} + L_r \sigma \frac{d i_{rd}}{dt} - g \omega_s L_r \sigma i_{qr} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + L_r \sigma \frac{d i_{rq}}{dt} + g \omega_s L_r \sigma i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s}\end{aligned}\quad (3.9)$$

D'après (3.9), la commande vectorielle de la GIDA revient alors à contrôler les deux puissances P_s et Q_s par les composantes V_{rd} et V_{rq} . A Partir des équations (3.8) et (3.9), on peut établir le schéma bloc de la GIDA, voir Fig. (3.2).

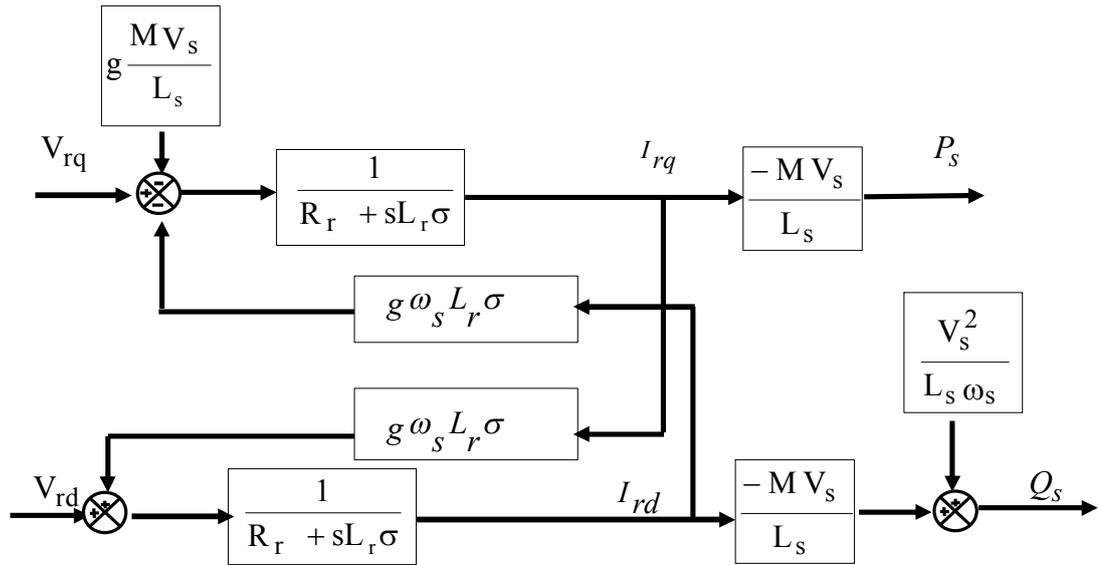


Fig. (3.2) Schéma bloc de la GIDA sous les contraintes du flux et de la tension orientés

Si l'on observe le schéma de la Figure (3.2), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M V_s}{L_s}$. Le modèle (3.9) est non linéaire à cause des termes de couplages $g \omega_s L_r \sigma i_{qr}$ et $g \omega_s L_r \sigma i_{dr}$. Les termes de couplage considérés sont souvent considérés comme des perturbations à compenser pour obtenir une commande découplée, i.e. en éliminant les interactions entre la commande des puissances directe et en quadrature.

Pour réaliser la commande bouclée, des régulateurs classiques de type PI sont utilisés. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle [28]. Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler séparément les puissances Q_s et P_s . A cet effet, deux modes de contrôle sont proposées:

3.3.1 COMMANDE DIRECTE

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la GIDA, dans lequel on négligera

les termes de couplages. Le schéma de la figure (3.3) présente le principe de la commande dite directe.

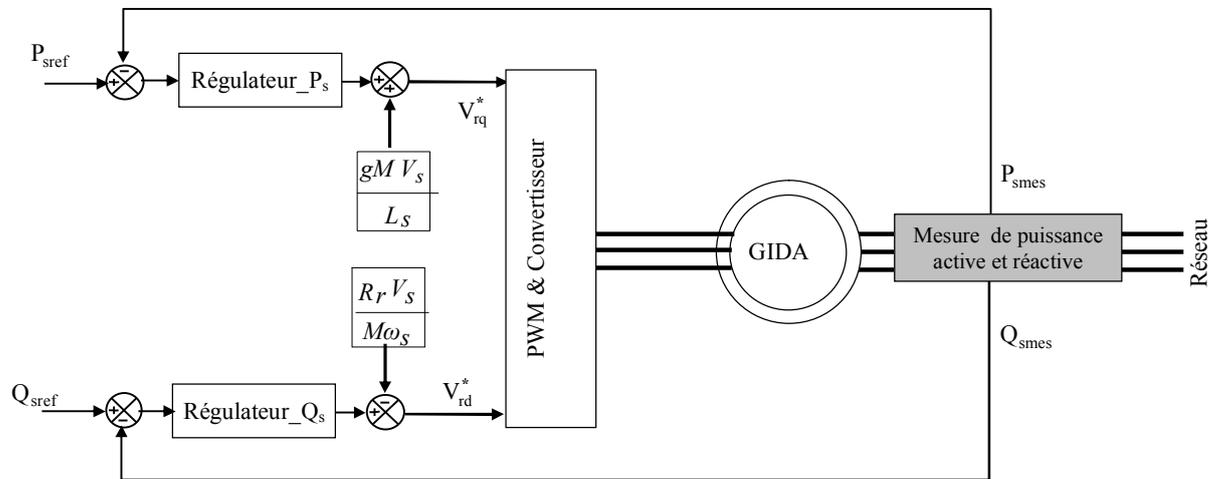


Fig. (3.3) Schéma de principe de la commande directe

La grandeur essentielle à contrôler avec une grande dynamique est la puissance active, car elle permettra à la machine de fonctionner à sa puissance maximale afin d'obtenir un bon rendement de l'ensemble du système. Cependant, il est aussi nécessaire de bien contrôler la puissance réactive de sorte que sa consigne sera maintenue nulle pour réaliser un facteur de puissance unitaire côté stator.

3.3.1 COMMANDE INDIRECTE

Afin d'améliorer la commande précédente, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la GIDA en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplage $g\omega_s L_r \sigma i_{qr}$ et $g\omega_s L_r \sigma i_{dr}$ considérés comme étant des perturbations non négligeables, et seront compensés. La commande, ainsi découplée, est réalisée au moyen de régulateurs PI. Il existe deux méthodes de découplage en boucle ouverte et en boucle fermée pour contrôler les puissances statorique. En boucle ouverte, les puissances ne sont pas contrôlées et elles le deviennent en boucle fermée.

A. La commande indirecte en boucle ouverte

Le schéma de l'ensemble commande bloc découplage machine est illustré sur la figure 4.18. Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd}^* et V_{rq}^* qui conviennent. De ce fait, la commande par boucle imbriquée (interne) qui contrôle le courant \bar{i}_r est alors appliquée à la GIDA pour des raisons de sécurité de fonctionnement [28]. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants i_{rd} et i_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte.

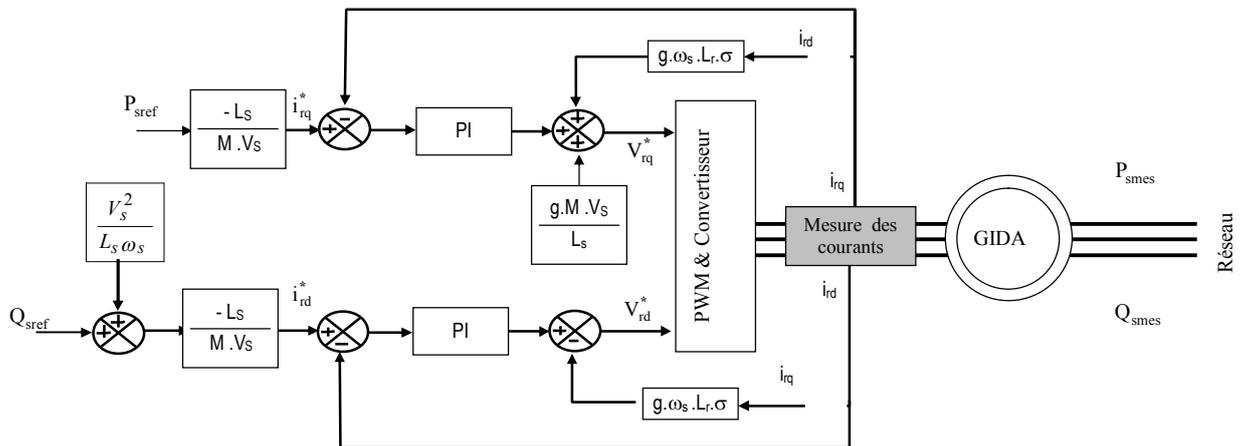


Fig. (3.4) Schéma de la commande indirecte sans contrôle de puissance

B. commande indirecte en boucle fermé

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants i_{rd} et i_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine [38]-[41] est illustré sur la figure (3.5).

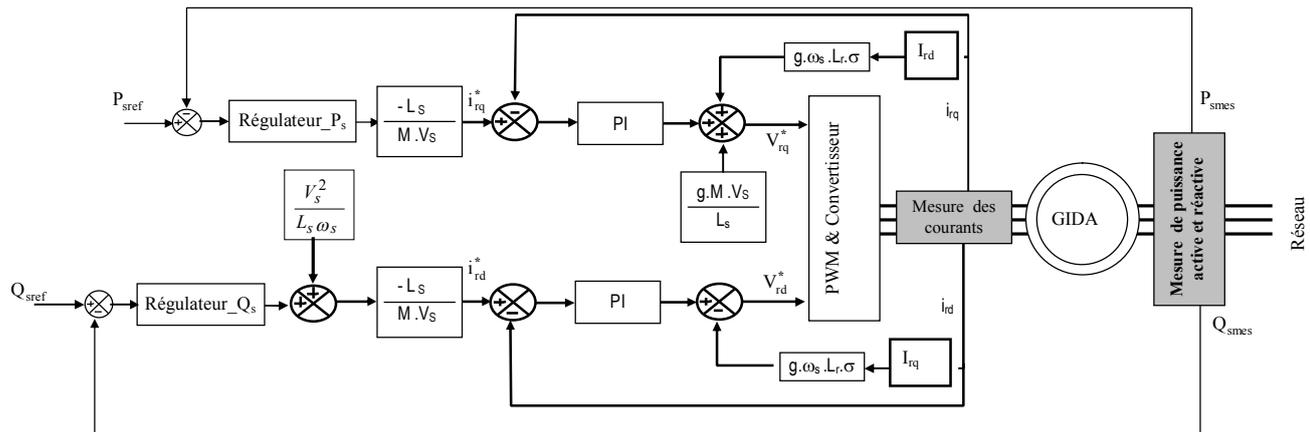


Fig. (3.5) Schéma de la commande indirecte avec contrôle de puissance

3.4 SIMULATION

3.4.1 La commande indirecte en boucle ouverte

1. Test à vitesse fixe

Pour valider notre approche, les essais de simulation sur la machine de 7.5kW seront définis selon le cahier des charges suivant :

- ✓ La *DFIG* est entraînée à vide à la vitesse de 1450 tr/min.
- ✓ **pour la puissance active :**
 - à t=1 s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de 0 à -2000W).
 - à t=2s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de -2000 à -7500W).
 - à t=4s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de -7500 à -5500W).
- ✓ **Pour la puissance réactive :**

La consigne de la puissance réactive est maintenue à zéro le long de simulation afin d'assurer un facteur de puissance unitaire coté statorique. $Q_{ref} = 0$ VAR.

2. Résultats

La Figure (3.6) représente la puissance active et réactive du stator et la Figure (3.7) représente les courants rotoriques direct et quadratique à vitesse de rotation fixe.

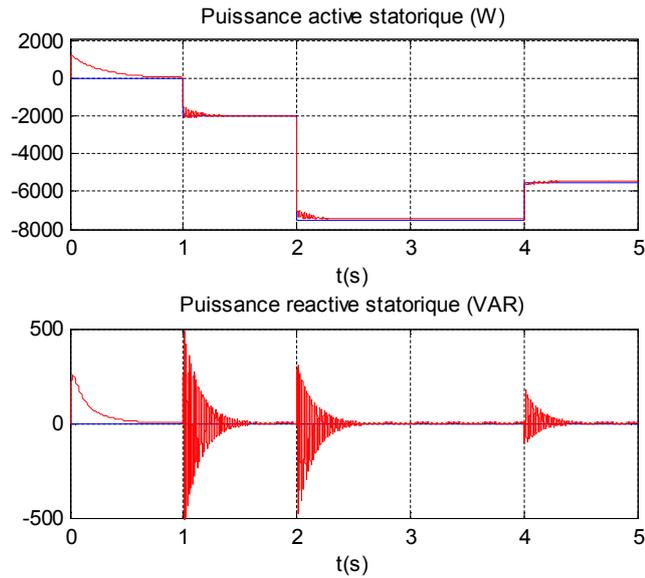


Fig. (3.6) Suivi de consigne des puissances active et réactive statorique

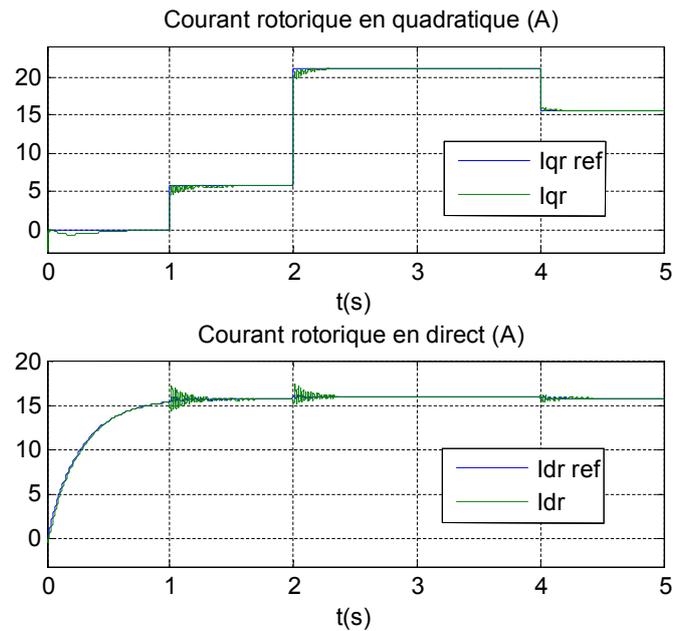


Fig. (3.7) Les allures des courants rotorique direct et quadratique.

3. Test à vitesse variable

La GIDA est entraînée à vide à la vitesse de 300rd/s, [voir Fig. (3.7)], après 1s une puissance $P = -5000$ W est injectée au réseau. Après 2.5s, à la même puissance, la vitesse est réduite à 150 rd/s. La puissance réactive est maintenue à zéro.

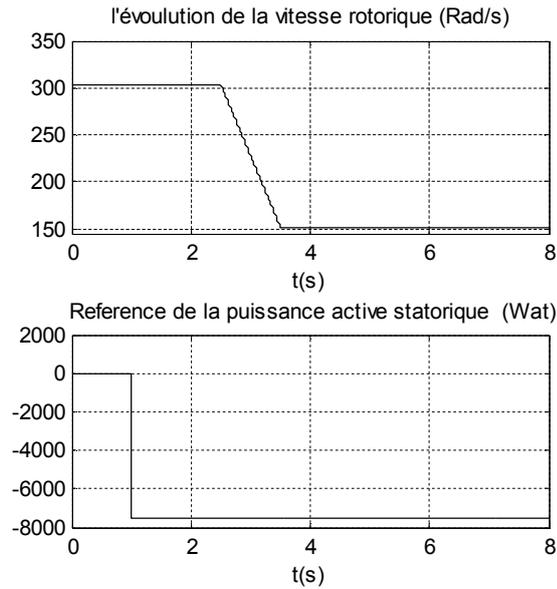


Fig. (3.8) Les références de la vitesse rotorique et de la puissance active statorique

4. Résultats

La Figure (3.9) représente la puissance active et réactive du stator à vitesse de rotation variable.

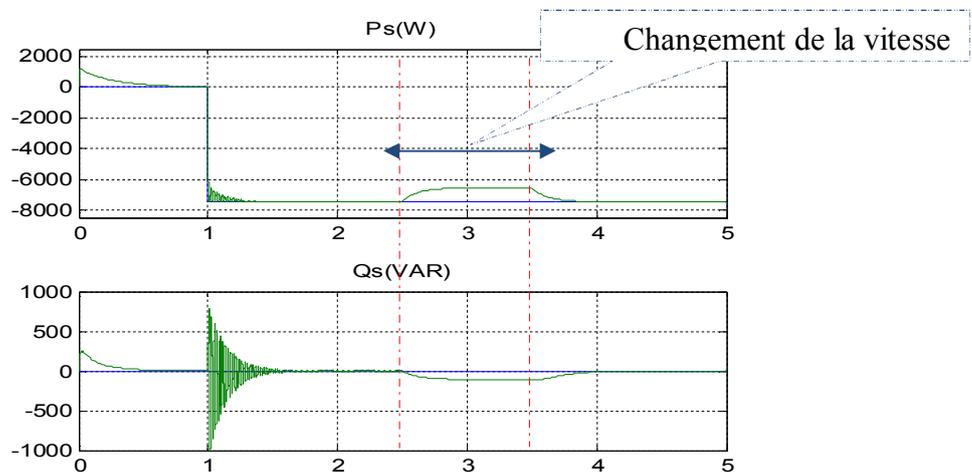


Fig. (3.9) Les puissances active et réactive statorique.

3.4.2 Interprétation de résultats

On remarque une bonne poursuite des puissances active et réactive du stator que se soit à vitesse fixe [voir Fig. (3.7)]. Pendant la variation de vitesse cette poursuite est mauvaise [voir

Fig. (3.8)]. On constate une faible erreur statique. La puissance réactive est maintenue à 0 kVAR ce qui correspond bien à un facteur de puissance unitaire. Les courants du rotor suivent une évolution normale suivant les puissances active et réactive du stator Fig. (3.7).

3.4.3 La commande indirecte en boucle fermée

- ✓ La DFIG est entraînée à vide à la vitesse de 1450 tr/min.
- ✓ **pour la puissance active :**
 - à $t=1$ s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de 0 à -2000 W).
 - à $t=2$ s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de -2000 à -7500 W).
 - à $t=4$ s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de -7500 à -5500 W).
- ✓ **Pour la puissance réactive :**

La consigne de la puissance réactive est maintenue à zéro le long de simulation afin d'assurer un facteur de puissance unitaire coté statorique. $Q_{ref} = 0$ VAR.

La Figure (3.10) représente les puissances active et réactive du stator et la Figure (3.11) représente les courants rotoriques direct et quadratique à vitesse de rotation fixe.

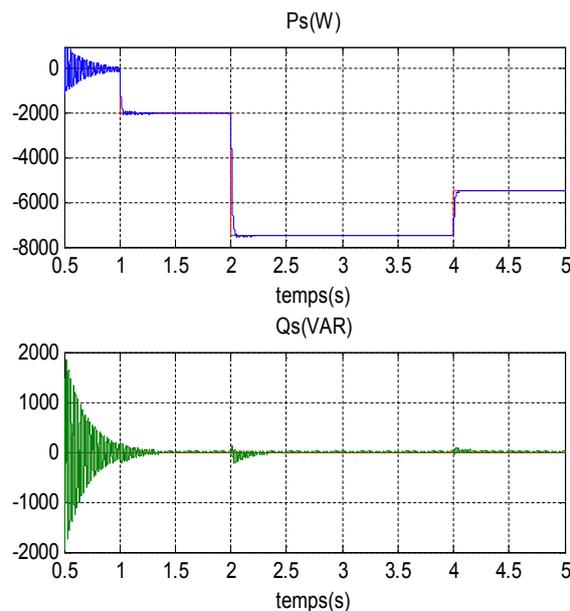


Fig. (3.10) Les puissances active et réactive statorique.

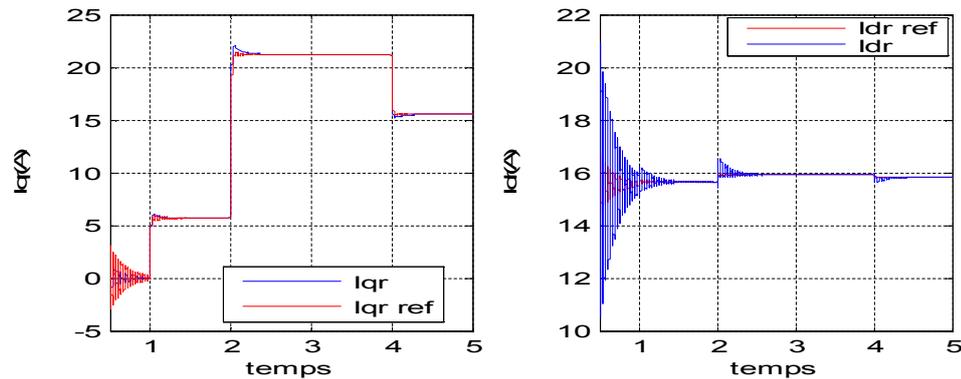


Fig. (3.11) Les courants direct et quadrature rotoriques.

3.4.4 Interprétation des résultats de simulation obtenus

On remarque une bonne poursuite des puissances active et réactive du stator que se soit à vitesse fixe ou variable [voir Fig. (3.9)]. On constate que l'erreur statique est nulle. La puissance réactive est maintenue à 0 VAR ce qui correspond bien à un facteur de puissance unitaire. Les courants du rotor, Fig. (3.11), ont une dynamique plus rapide par rapport à ceux en BO Fig.(3.7).

3.5 CONCLUSION

Parmi les avantages de la GIDA est l'utilisation d'un seul convertisseur de puissance réduite au rotor associé à une commande vectorielle simple où l'on peut contrôler le flux d'énergie à vitesse variable. Le découplage entre la puissance active et réactive du stator permet de garder le facteur de puissance près de l'unité. La simulation de la commande vectorielle met en exergue les capacités de la GADA à travailler en génératrice couplée au réseau. Mais il est nécessaire de connaître les limites de ces capacités, ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4

**LA CAPACITE DES PUISSANCES DE LA GENERATRICE A
INDUCTION DOUBLE ALIMENTEE****4.1 INTRODUCTION**

Bien que les capacités de puissances du générateur synchrones ont été intensivement étudiées, les capacités de puissance de la génératrice à induction double alimentée (GIDA) sont peu connues. Ce genre de générateur est largement répandu dans les applications à vitesse variable tel que l'énergie éolienne, et ses possibilités de puissance réactive doivent être connues afin de projeter les possibilités réactives des fermes de vent selon les exigences des codes des réseaux électriques. Les puissances active et réactive de la GIDA peuvent être exprimées en fonction des tensions statorique et rotorique, permettant la représentation graphique des limites de la capacité des puissances d'une manière analogue à celle du générateur synchrone.

Pendant les dernières années, la configuration la plus utilisée dans des projets de puissance a été la GIDA. Dans la littérature, cette configuration est connue comme type C qui est montré sur le figure (4.1), [42]. L'avantage principal de cette configuration est qu'il permet l'opération de variable-vitesse. Les convertisseurs alimentent les circuits de basse fréquence de rotor de la grille. Les convertisseurs sont partiellement mesurés exigeant une puissance évaluée environ de 30% de l'estimation de générateur. Habituellement, le glissement vari entre 30% à la vitesse hypo-synchrone et -30% à la vitesse hyper-synchrone [43]-[51].

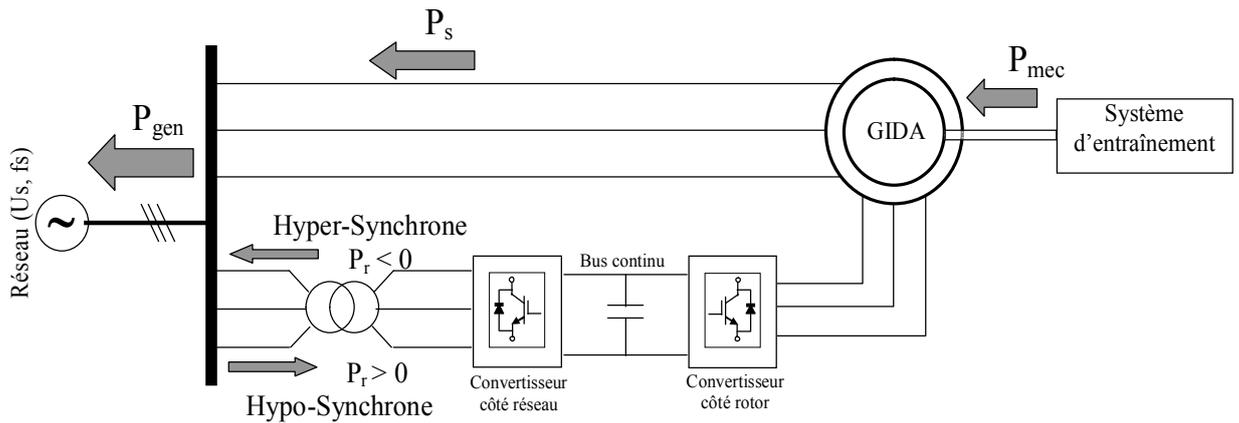


Fig. (4.1) Configuration de la GIDA couplée sur un réseau infini.

Généralement, le convertisseur du côté réseau est commandé pour avoir un facteur de puissance unitaire et avec une tension du bus continu constante. Le convertisseur du côté rotor est habituellement commandé pour contrôler la puissance active et réactive du stator de la GIDA. On suppose que ce convertisseur fournit des tensions triphasées sinusoïdales à la fréquence de glissement. Par conséquent, supposant que les convertisseurs sont sans pertes, la puissance nette injectée par le générateur à la grille est donné comme suit :

$$\begin{aligned} P_{\text{gen}} &= P_s - P_r \\ Q_{\text{gen}} &= Q_s \end{aligned} \quad (4.1)$$

Où P_s et Q_s sont les puissances active et réactive du stator. P_r est la puissance active injectée par le convertisseur du côté rotor de la GIDA.

4.2 MODELE DE GIDA EN REGIME PERMANANT

Afin de comprendre les limites des capacités de la machine, une analyse en régime permanent du modèle de la GIDA est nécessaire. Le modèle de la GIDA est développé dans le référentiel synchrone, donc toutes les variables sont continues. Par conséquent, le schéma équivalent en régime permanent de la GIDA peut être obtenu, les équations équilibrées suivantes sont obtenues.

$$\begin{aligned}
V_{sd} &= -R_s i_{sd} + X_s i_{sq} - X_m i_{rq} \\
V_{sq} &= -R_s i_{sq} - X_s i_{sd} + X_m i_{rd} \\
\frac{V_{rd}}{g} &= \frac{R_r}{g} i_{rd} + X_m i_{sq} - X_r i_{rq} \\
\frac{V_{rq}}{g} &= \frac{R_r}{g} i_{rq} - X_m i_{sd} + X_r i_{rd}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Rappelant que la relation entre les variables peuvent être représentées vectoriellement par des phaseurs [52], [53]. Ainsi, en utilisant les équations (4.2), on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
\bar{V}_s &= -(R_s + jX_s)\bar{i}_s + jX_m\bar{i}_r \\
\frac{\bar{V}_r}{g} &= \left(\frac{R_r}{g} + jX_r\right)\bar{i}_r - jX_m\bar{i}_s
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Les équations (4.3) définissent le modèle de la GIDA en régime permanent (voir Fig. (4.2)).

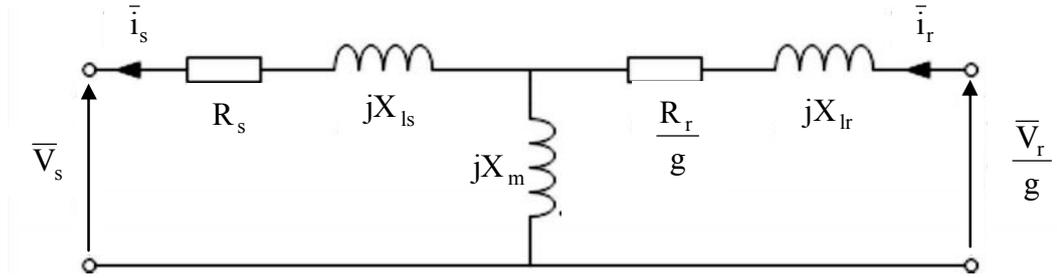


Fig. (4.2) Schéma équivalent de la machine à induction double alimentée.

4.3 ETUDE ANALYTIQUE PAR CIRCUIT EQUIVALENT

Supposant que les sens des courants de la machine sont définis comme l'indique la figure

(4.2), la puissance électromagnétique qui traverse l'entrefer est injectée par la source $\frac{V_r}{g}$

après qu'on retranche les pertes dans la résistance $\frac{R_r}{g}$, alors on peut écrire :

$$P_{em} = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \bar{i}_r^*\right) - \frac{R_r}{g} i_r^2 \tag{4.4}$$

Avec \Re et la partie réelle.

La puissance électromagnétique peut être écrite comme suit [42] :

$$P_{em} = P_{mec} + \Re(\bar{V}_r \bar{i}_r^*) - R_r i_r^2 \quad (4.5)$$

En comparant (4.4) et (4.5), la puissance sera:

$$P_{mec} = \left(P_r - R_r i_r^2 \right) \frac{1-g}{g} \quad (4.6)$$

La figure (4.3) représente le schéma équivalent modifié dont le quel est présenté la puissance mécanique et la puissance injectée par le convertisseur coté rotor. La puissance au stator est égale à $(P_{mec} + P_r - P_{losses} = P_s) \Rightarrow P_{gen} = P_s - P_r = P_{mec} - P_{losses}$

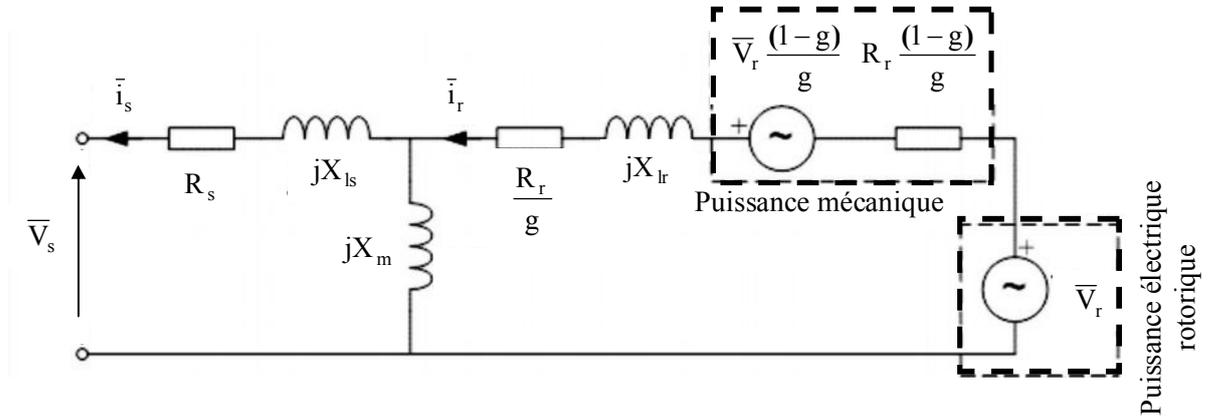


Fig. (4.3) Schéma équivalent modifié de la GIDA

Le rendement (η) de la GIDA dépend de son mode de fonctionnement. Si elle fonctionne en moteur alors $|P_{gen}| > |-P_{mec}|$, par contre en générateur $|P_{gen}| < |-P_{mec}|$, donc :

$$\eta_{gen} = \frac{P_{gen}}{P_{mec}} = \frac{P_{mec} - P_{losses}}{P_{mec}} \quad (4.7)$$

$$\eta_{gen} = \frac{P_r \frac{(1-g)}{g} - R_r i_r^2 \frac{1}{g}}{\left(P_r - R_r i_r^2 \right) \frac{(1-g)}{g}} \quad (4.8)$$

Dans le cas ou $V_r=0$, on retrouve le rendement de machine à induction à rotor en court-circuit

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{1}{(1-g)} \quad (4.9)$$

Celui du moteur est l'inverse : $\eta_{\text{mot}} = \eta_{\text{gen}}^{-1} = (1-g)$.

4.4 LES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DE LA GIDA

Afin de comprendre l'effet des tensions du rotor, la puissance active et réactive délivrés par le générateur est obtenue pour deux cas. Dans le premier, on suppose que $V_{rd}=0$ tandis que V_{rq} varie de $-20V$ à $+20V$. Dans le second, on suppose que $V_{qr}=0$ tandis que V_{rd} varie de $-20V$ à $+20V$.

Les figures (4.4) et (4.5) représentent les puissances active et réactive générées par la GIDA pour différentes tensions rotorique V_{rd} et V_{rq} .

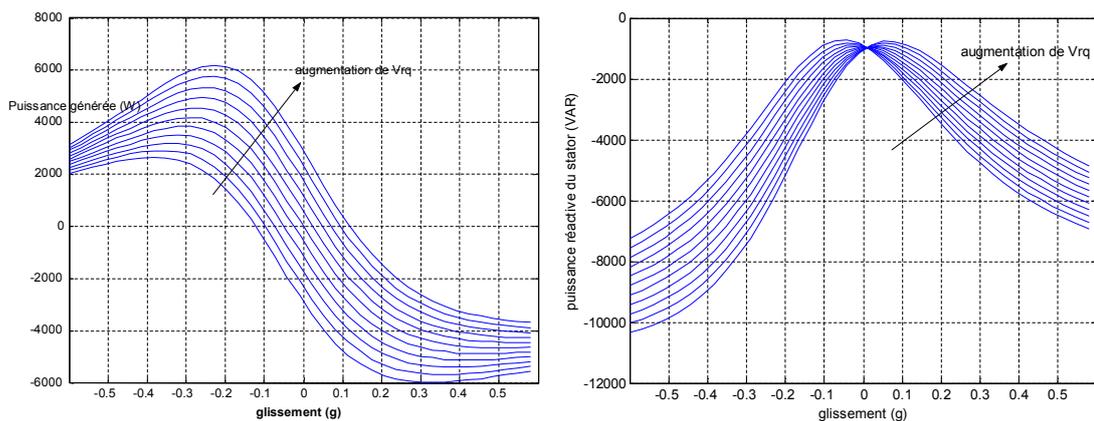


Fig. (4.4) Les puissances générées en fonction du glissement pour différents V_{rq} avec $V_{rd} = 0$.

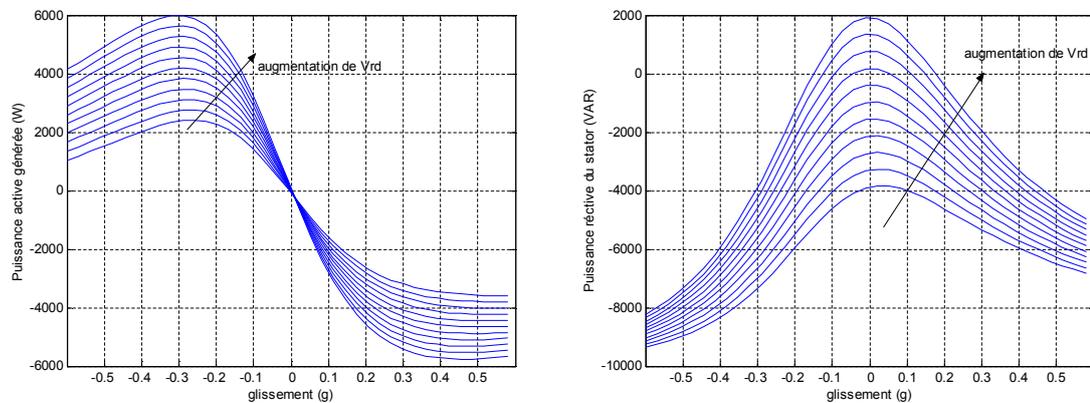


Fig. (4.5) Les puissances générées en fonction du glissement pour différents V_{rd} avec $V_{rq} = 0$.

Quand la tension de rotor V_{rq} augmente, la caractéristique active de la puissance est décalée vers le haut, c.-à-d., une puissance plus active change de sens, cependant, une puissance plus réactive est générée par la machine (voir Fig (4.4)).

Si la tension du rotor V_{rd} augmente, la caractéristique de puissance réactive est décalée vers le haut, et change de sens. La puissance active augmente et dépend du régime de fonctionnement hypo/hyper synchrone (voir Fig (4.5)).

Ces résultats montrent la capacité de la GIDA à produire de la puissance réactive. En plus, il est évident l'existence d'un couplage fort entre les deux paires (P_{gen}, V_{rq}) et (Q_{gen}, V_{rd}) et un couplage faible entre les deux paires (P_{gen}, V_{dr}) et (Q_{gen}, V_{qr}) .

4.5 CAPACITES DES PUISSANCES P_Q DE LA GIDA

La capacité en puissance réactive de la machine à induction double alimentée est similaire à celles du générateur synchrone. Elles dépendent de la puissance active produite, du glissement et des limitations dues aux courant statorique et rotorique maximaux ainsi que la tension du rotor maximal [52] et [53]. Afin de comprendre la courbe des capacités des puissances, les relations suivantes sont obtenues à partir du schéma équivalent (Fig. (4.2)).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + jX_s) & jX_m \\ -jX_m & (\frac{R_r}{g} + jX_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \\ g \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{V}_r \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & jX_m \\ R_s + jX_s & R_s + jX_s \\ \frac{jX_m}{R_s + jX_s} & (\frac{R_r}{g} + jX_r + \frac{X_m^2}{R_s + jX_s}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_r \\ g \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_r + jX_r}{g} & \frac{(\frac{R_r}{g} + jX_r)(R_s + jX_s) + X_m^2}{g} \\ jX_m & jX_m \\ \frac{1}{jX_m} & \frac{R_s + jX_s}{jX_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{i}_s \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{i}_s \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Avec $Y=Z^{-1}$

Considérant que les convertisseurs et le bus continu sont sans pertes et le convertisseur de côté réseau est fonctionne à facteur de puissance unitaire. Toute la puissance injectée par la génératrice à induction double alimentée est égale à $\bar{S}_{\text{gen}} = \bar{S}_s - \Re\{\bar{S}_r\}$ où \bar{S}_s est la puissance apparente au stator et \bar{S}_r est la puissance apparente au rotor. En utilisant l'équation (4.12), ces puissances sont définies par,

$$\bar{S}_s = \bar{V}_s \bar{i}_s^* = \bar{V}_s (G_{11} \bar{V}_s + G_{12} \bar{i}_r)^* = \frac{-1}{R_s - jX_s} V_s^2 + \frac{-jX_m}{R_s - jX_s} \bar{V}_s \bar{i}_r^* \quad (4.14)$$

$$\bar{S}_r = \bar{V}_r \bar{i}_r^* = \bar{V}_s (G_{11} \bar{V}_s + G_{12} \bar{i}_r)^* = \frac{jgX_m}{R_s + jX_s} \bar{V}_s \bar{i}_r^* + g \left(\frac{R_s}{g} + jX_r + \frac{X_m^2}{R_s + jX_s} \right) \bar{i}_r^2 \quad (4.15)$$

Généralement, $R_s \ll X_s$ et $R_r \ll X_r$. Les résistances des équations (4.14) et (4.15) peuvent être négligées. Ainsi la puissance du rotor $P_r = \Re(\bar{S}_r) \approx g \Re(\bar{S}_s) = gP_s$.

La figure (4.6), représente le flux des puissances dans la GIDA pour les modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone. En résumé, $\bar{S}_{\text{gen}} = \bar{S}_s - gP_s$.

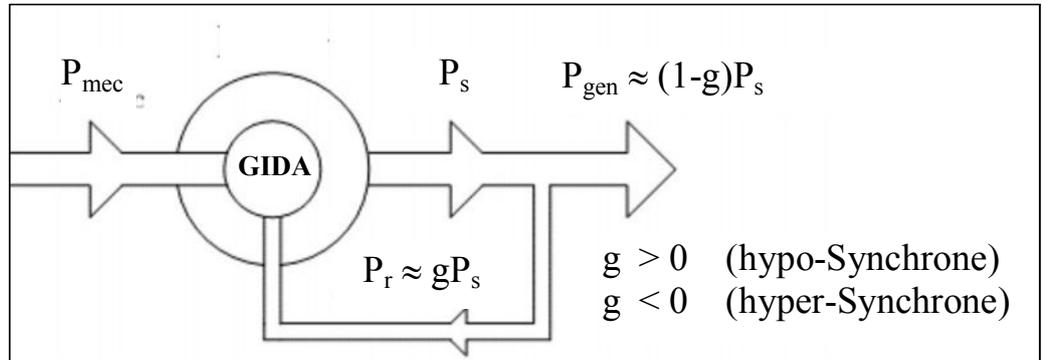


Fig. (4.6) Flux des puissances dans la machine à induction double alimentée.

1. Courant statorique maximal:

On suppose que le vecteur de tension statorique est la référence de phase $\bar{V}_s = V_s e^{j0}$, le courant rotorique $\bar{i}_r = I_r e^{-j\gamma}$, le courant statorique $\bar{i}_s = I_s e^{-j\lambda}$, la puissance apparente injectée par le générateur est obtenu comme suit

$$\bar{S}_s = \bar{V}_s \bar{i}_s^* \quad (4.16)$$

$$\bar{S}_r = \bar{V}_r \bar{i}_r^* = g(B_{11} \bar{V}_s + B_{12} \bar{i}_s)(B_{21} \bar{V}_s + B_{22} \bar{i}_s)^* \quad (4.17)$$

Les équations (4.16) et (4.17) représente une ellipse dont le centrée à l'origine dans le plan P-Q. Pour $I_s=I_{rmax}$ on peut définir la 1^{er} limite de fonctionnement. Fig. (4.7).

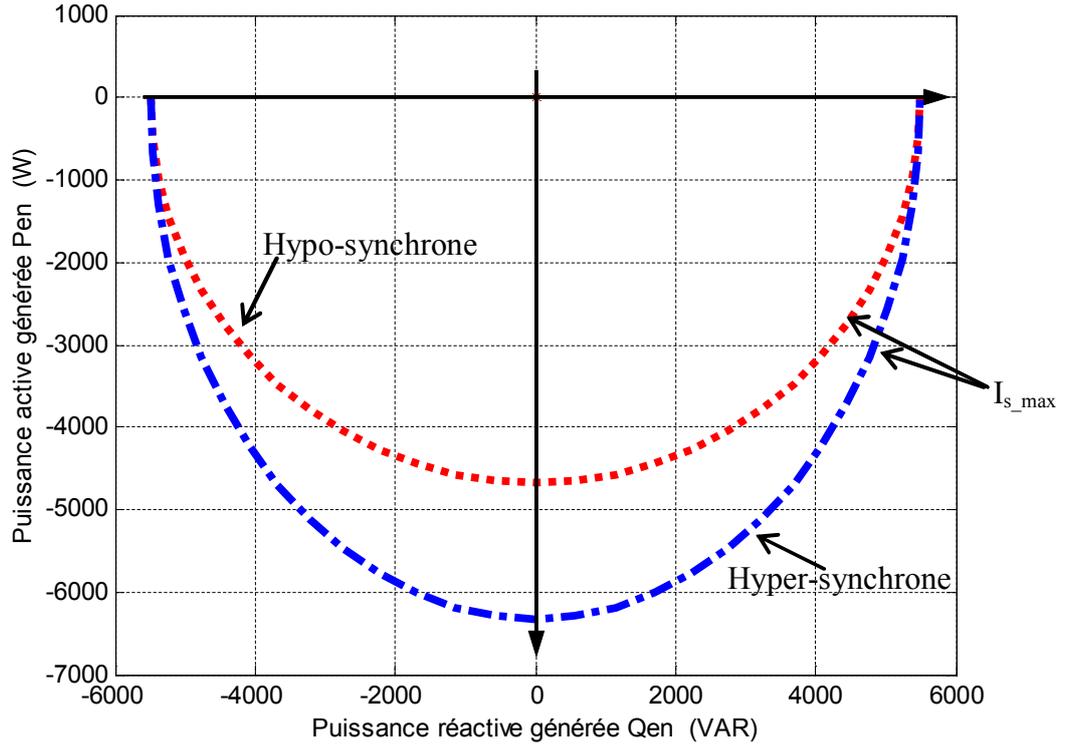


Fig. (4.7) La capacité de la GIDA en fonction du courant statorique maximal

2. Courant rotorique maximal:

La puissance apparente peut être réécrite en fonction du courant rotorique comme suit :

$$\begin{aligned} \bar{S}_{gen} &\approx \frac{V_s^2}{jX_s} + \frac{X_m}{X_s} \bar{V}_s \bar{i}_r^* - g\Re(\bar{S}_s) \\ &\approx \frac{V_s^2}{jX_s} + \frac{X_m}{X_s} \bar{V}_s \bar{i}_r^* - g\Re(\bar{S}_s) \\ &= -j \frac{V_s^2}{X_s} + (1-g) \frac{X_m}{X_s} V_s I_r \cos \delta + j \frac{X_m}{X_s} V_s I_r \sin \delta \end{aligned} \quad (4.18)$$

L'équation (4.18) représente une ellipse dont le center est $(0, \frac{V_s^2}{X_s})$ dans le plan P-Q. Pour

$I_r=I_{r_{max}}$ on peut définir les limites de la capacité de la GIDA (voir Fig. (4.8)).

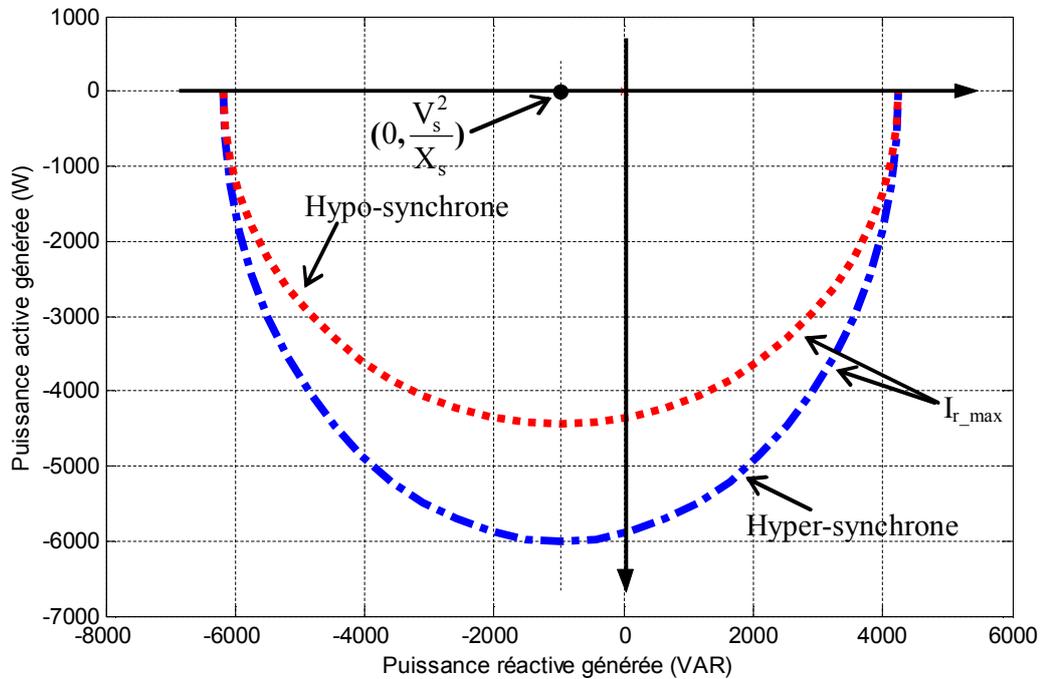


Fig. (4.8). La capacité de la GIDA en fonction du courant rotorique maximal

La Figure (4.9) représente les courbes de la capacité pour des vitesses hypo-synchrone et hyper-synchrone dans le plan P_Q. utilisant les deux limites cité précédemment pour définir les capacités de la GIDA.

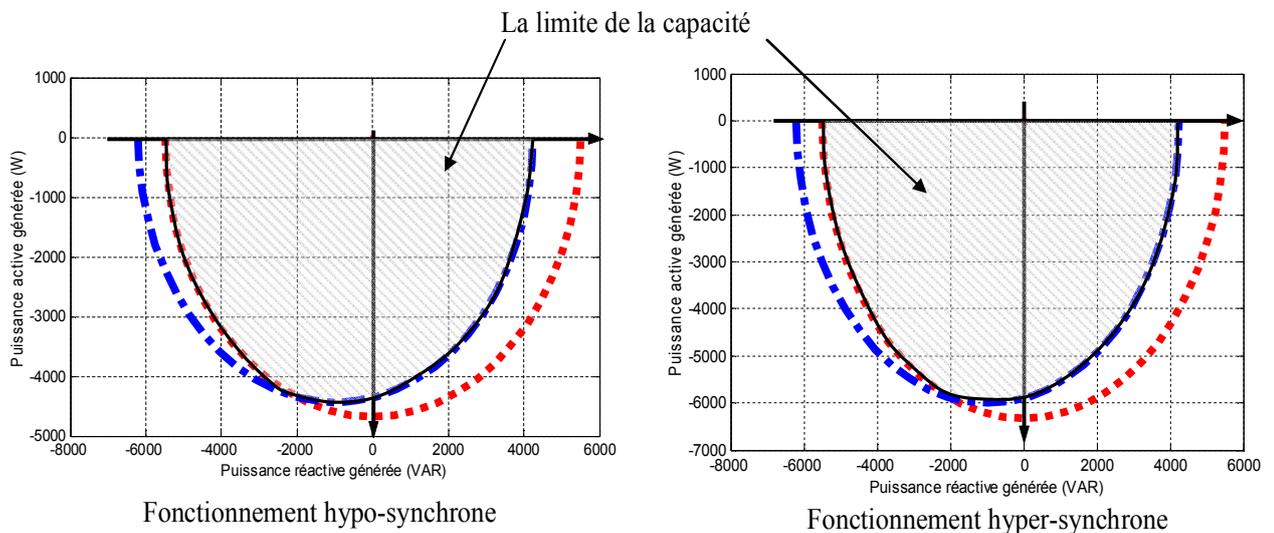


Fig. (4.9) La limite de la capacité de la GIDA

4.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre est présentée une étude analytique de la génératrice à induction double alimentée en régime permanent à vitesse variable.

En utilisant un modèle dynamique (dans le référentiel synchrone) développé dans le deuxième chapitre, un circuit équivalent modifié est déduit. Les couplages entre les puissances active et réactive générée par la GIDA ont été analysés et la capacité du DFIG de produire la puissance réactive est étudiée. A partir du circuit équivalent les capacités de puissance de la GIDA ont été obtenues. En tenant compte des courants statorique et rotorique maximaux, la frontière d'une exploitation stable est décrite par une région elliptique dans le plan P_Q .

En conclusion, les capacités de la GIDA présentent une similitude à la celle du générateurs synchrones conventionnels.

CONCLUSION GENERALE

1. Contexte

Malgré la présence des bagues, la double accessibilité (au rotor et au stator) est l'un des principaux avantages de la machine à induction double alimentée. Ceci facilite son identification des paramètres et la possibilité de mesurer les grandeurs électriques des deux armatures.

La nature asynchrone de la machine à induction double alimentée permet la production d'énergie électrique de fréquence constante à partir d'un système d'entraînement à vitesse variable autour du point de synchronisme (hypo-synchrone et hyper-synchrone). De tel système possède plus de souplesse du point de vue commande par rapport à ceux utilisant la vitesse fixe comme le cas standard des générateurs synchrones et asynchrones à cage. Comme il donne lieu à une augmentation du rendement près de 10% avec les systèmes d'entraînement à Diesels ou hydroélectriques. Dans les systèmes de génération à énergie éolienne, l'ajustement de la vitesse de la machine à induction double alimentée est fonction de la vitesse du vent pour permettre une capture d'énergie assez élevée en maximisant le rendement de la turbine.

Dans le même contexte, on peut considérer ce mémoire comme une **petite fenêtre** sur la modélisation et la commande des puissances de la génératrice à induction double alimentée (GIDA) couplée à un réseau électrique puissant.

Les deux étapes suivies pour réaliser ce travail sont comme suit:

La première étape, c'est la validation de la modélisation proposée de la GIDA dans un référentiel commun par des simulations sous l'environnement Matlab/Simulink, en fonctionnement à vitesse variable hypo-synchrone et hyper-synchrone, les résultats obtenus vérifient le fonctionnement de la GIDA et montrent un couplage entre les puissances active et réactive.

La deuxième étape, c'est la réalisation de la commande des puissances de la génératrice à induction double alimentée couplée à un réseau puissant à l'aide d'une commande vectorielle indirecte et directe par l'orientation du flux statorique. L'intérêt de la commande est d'aboutir à un découplage entre les puissances active et l'expression plus élémentaire du modèle de la réactive. Le contrôle du flux de puissance active et réactive permet un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Les résultats des simulations démontrent que la commande réalisée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de production de l'énergie éolienne couplée à un réseau puissant.

Finalement, une étude analytique à l'aide du circuit équivalent a permis de déterminer la limite de la capacité de puissance de la GIDA.

2. PERSPECTIVES

Pour la continuité de ce travail, il nous vient à l'esprit de définir les axes de recherches qui sont, à notre avis, prometteurs pour le développement de la MADA :

1. Application des commandes robustes qui tient compte des variations paramétriques et les incertitudes paramétriques.
2. La détermination des limites de capacité en présence de l'MPPT.
3. Intégration d'un système de stockage dans une éolienne à vitesse variable en vue d'un fonctionnement sur réseau ou sur charges isolées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Thanh Luong LE, “Analyses dynamique du réseau de distribution en présence des productions décentralisées”, Thèse de Doctorat, Grenoble, France, Janvier 2008.
- [2]. Y. N. Yu, *Electric Power Systems Dynamics*, (Academic Press, New York, 1983).
- [3]. P. Kundur, *Power System Stability and Control*, (New York: McGraw-Hill, 1994).
- [4]. S. El Aïmani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, ENSAM Lille, 2004.
- [5]. Nesmat ABU-TABAK, “ Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation ”, Thèse de Doctorat, Lyon, France, *Novembre 2008*
- [6]. Vicatos M. S. and Tegopoulos J. A. ‘A Doubly-Fed Induction Machine Differential Drive Model for Automobiles’ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 2003, 18, (2), pp. 225-230.
- [7]. J. Mahseredjian, S. Denetière, L. Dubé, B. Khodabakhchian, L. Gérin-Lajoie, "On a new approach for the simulation of transients in power Systems", in *Proceedings of the International Conférence on Power Systems Transients, IPST 2005 in Montréal*, June 19^h-23rd, 2005.
- [8]. J. Usaola, P. Ledesma, "Dynamic incidence of wind turbines in networks with high wind pénétration", in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, 2001, pp. 755 - 760.
- [9]. A. Ilinca, E. Me Carthy, J-L. Chaumel, "Wind potential assessment of Québec Province", *Renewable Energy*, vol 28, issue 12, pp1881-1897, 2003.
- [10]. H. Amaris, C. Vilar, J. Usaola, J.L. Rodriguez, "Frequency Domain Analysis of Flicker Produced by Wind Energy", in *Proceedings of the 8th International Conférence on Harmonics and Quality of Power ICHQP' 98, Athens, Greece*,

- October 14-16, 1998.
- [11]. C.R. Kelber, W. Schumacher, "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Génération with Doubly-Fed Induction Machines", Grenoble VSSH, 2000.
 - [12]. W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 2nd completely revisited and enlarged édition, Berlin : Springer-Verlag, 1996.
 - [13]. S. Müller, M. Deicke, R.W. De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines" *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, issue 3, pp 26-33, May June 2002.
 - [14]. B. Marinescu, "A Robust Coordinated Control of the Doubly-Fed Induction Machine for Wind Turbines : a State-Space Based Approach", in *Proceedings of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts*, June 30 - July 2, 2004.
 - [15]. L. Xu, W. Chang, "Torque and reactive Power Control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme", *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 31, pp. 636-642, May - June 1995.
 - [16]. S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli, "Robust Active-Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Generator", in *Proceedings of the 24^h Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 3, September 1998, pp. 1621-1625,.
 - [17]. S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli, "Dynamic Output Feedback Linearizing Control of a Doubly-Fed Induction Motor", in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, July 1999, pp. 1256-1260.
 - [18]. F. Wang, C. Lin, J. Zhu, L. Xu, "A Chopping and Doubly-Fed Adjustable Speed System Without Bi-directionnal Converter", in *Proceedings of the 37th IAS Annual meeting. Conference Record on the Industry Applications*, vol. 4, October 2002, pp. 2393-2397.
 - [19]. L Zhang, C. Watthanasarn, W. Shepherd, "Application of a Matrix Converter for the Power Control of a Variable-Speed Wind-Turbine Driving a Doubly-Fed Induction Generator", in *Proceedings of the 23^d International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, vol. 2, November 1997, pp. 906-911.
 - [20]. C. Abbey, G. Joôs, "Optimal Reactive Power Allocation in a Wind Powered Doubly-Fed Induction Generator", in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Général Meeting*, vol.2, June 2004, pp. 1491 -1495.

-
- [21]. I. Boldea, *Variable Speed Generators*, Boca Raton : CRC Press - Taylor & Francis, 2006.
- [22]. A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [23]. S. El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologie d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension ", Thèse de doctorat, Université de Lille
- [24]. Y. Alhassoun, "Etude et Mise en Œuvre de Machines à Aimantation Induite Fonctionnant à Haute Vitesse", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 Mai 2005.
- [25]. M. Djurovic, G. Joksimovic, R. SaveljiC, I Marieic, "Double Fed Induction Generator with Two Pair of Poles", Elektrotehniku fakultet Podgorica, Sever Subotica, Yugoslavia
- [26]. S. Drid, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation", Thèse de doctorat, Université de Batna décembre 2005.
- [27]. J. L. Rodriguez-Amenedo, S. Arnalte, J. C. Burgos, "Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.17, No.2, June 2002.
- [28]. F. Poitiers, "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Énergie Éolienne", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [29]. Drid S., Nait-Said M.S., « Modélisation Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation dans les Référentiels Séparés ». Proceedings of the 3rdConference on Electrical Engineering 10-11 December CEE'02, BATNA 2002.
- [30]. Drid S., Nait-Said M.S. and Tadjine M., "The Doubly Fed Induction Machine Modeling In The Separate Reference Frames". *Journal of Electrical Engineering, JEE*. Vol.4, N°1, 2004, pp:11-16
- [31]. Drid S., Naït-Saïd M.S., Tadjine M. and Menacer M., "The Doubly Fed Induction Generator Modeling in the Separate Reference Frames for an Exploitation in an Isolated Site with Wind Turbine," *Third IEEE International Conference on Systems, Signals & Devices SSD'05*, March 21-24, 2005, Sousse - Tunisia

-
- [32]. Leonhard W., *Control Electrical Drives*, Springer verlag Berlin Heidelberg 1985. Printed in Germany.
- [33]. Klaus Trangbæk, *Linear Parameter Varying Control of Induction Motors*, Ph.D. thesis, Department of Control Engineering Aalborg University, Denmark. June 2001
- [34]. Nait-said N., “Contribution a l’identification et a la commande de la machine à induction” Thèse de doctorat université de Batna 2003.
- [35]. Holtz J0., “the representation of AC Dynamics by complex signal flow graphs,” *Inverted*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.13, pp.245-271, 1995.
- [36]. Lesenne J., Notelet F. et Séguier G., “Introduction à l’Electrotechnique Approfondie,” Edition Techniques et Documentation Lavoisier, Paris 1981.
- [37]. Nait-Said M.S. & Nait-Said N., “Modélisation Vectorielle d’une Machine à Courant Alternatif Triphasée & Symétrique,” Notes de Cours éditées Université de Batna, Avril 2004.
- [38]. Gbriel O.Cimuca, “Système Inertiel de Stockage d’Energie Associe a des Générateur Éoliens”, Thèse de Doctorat, Ecole national d’arts et Métiers Centre de Lille 2005, France.
- [39]. Debiprasad P., Benedict E. L. Venkataramanan G. and Lipo T. A. “A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine”, *Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE*, Vol.3, 30 Sept.-4Oct. 2001, pp. 1695-1702.
- [40]. V. Rogez, “Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l’Intégration d’une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire”, Thèse de Doctorat, Université d’Artois décembre 2004, France.
- [41]. H. Camblong "Minimisation de l’Ampact des Perturbation d’Origine Eolienne Dans La Génération D’Electricité Par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable", Thèse De Docteur Bordeaux, 2003.
- [42]. D. Santos-Martin, S. Arnaltes, J.L. Rodriguez Amenedo, “Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators,” *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 1837–1840, Elsevier

-
- [43]. T. Ackermann, *Wind power in power systems*, John Wiley and Sons, Ltd., 2005.
- [44]. R. Scherer, "Blade design aspects," *Renewable Energy*, vol.16, pp.1272-1277, 1999
- [45]. P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Wiley-IEEE Press, 2nd ed., 2002
- [46]. H.A. Pulgar-Painemal, P.W. Sauer, "Dynamic modeling of wind power generation," North American Power Symposium, Mississippi, 2009.
- [47]. D. Stojanovic, D. Petrovic, N. Mitrovic, "Analysis of torsional torques of big turbine-generator shafts," *International Conference on Power System Transients*, Budapest, Hungary, pp.301-306, 1999.
- [48]. S. Ahmed-Zaid, M. Taleb, "Structural modeling of small and large induction machines using integral manifolds," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.6, no.3, pp.529-535, 1991.
- [49]. E. Drennan, S. Ahmed-Zaid, P.W. Sauer, "Invariant manifolds and start-up dynamics of induction machines," North American Power Symposium, Missouri, 1989.
- [50]. L. Jiao, Boon-Teck Ooi, G. Joos, F. Zhou, "Doubly-fed induction generator (DFIG) as a hybrid of asynchronous and synchronous machines," *Electric Power Systems Research*, vol.76, pp.33-37, 2005.
- [51]. V. Akhmatov, "Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part III: Model with the back-to-back converters," *Wind Engineering*, vol.27, no.2, pp.79-91, 2003.
- [52]. T. Lund, P. Sorensen, "Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator," *Wind Energy*, vol.0, pp.379-394, 2007.
- [53]. D. Santos-Martin, S. Arnaltes, J.L. Rodriguez-Amenedo, "Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators," *Electric Power Systems Research*, vol.78, pp.1837-1840, 2008.

ANNEXE

ANNEXE

Données de la première machine à induction double alimentée

Valeurs nominales : 7,5 kW ; 220/380 V-50 Hz ; 15/8.6 A , 1440 tr mn

Paramètres:

$$R_s \text{ (Résistance du stator)} = 1.2 \Omega$$

$$R_r \text{ (Résistance du rotor)} = 1.8 \Omega$$

$$L_s \text{ (Inductance d du stator)} = 0.1554 \text{ H}$$

$$L_r \text{ (Inductance de rotor)} = 0.1568 \text{ H}$$

$$M \text{ (Inductance mutuelle)} = 0.15 \text{ H}$$

Constantes mécaniques:

$$J \text{ (Inertie du rotor)} = 0.2 \text{ kg.m}^2$$

$$f_f \text{ (Coefficient de frottement)} = 0.00 \text{ I.S.}$$