

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en électrotechnique

Option : **Machines Electriques**

CHERFA Souad

KELLAS Nouara

Thème

Commande en Puissance de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par les régulateurs PI et RST

Mémoire soutenu publiquement le 08 / 07 / 2018 devant le jury composé de :

M. S. HADDAD

Professeur, UMMTO, président

M. M. SI BRAHIM

Maitre de Conférence classe B, UMMTO, promoteur

M^{elle} R.KACHENOURA

Maitre de Conférence Classe B, UMMTO, examinatrice

M^{me} F.MEGHERBI-BITAM

Professeur, UMMTO, examinatrice

Promotion 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu pour le courage et la patience qu'il nous a accordé pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur Monsieur

M. SI BRAHIM maitre de conférence classe B à l'UMMTO d'avoir accepté de dirigé notre travail et pour sa disponibilité, ses orientations, ses encouragements, ses conseils, l'intérêt et la confiance qu'il nous a porté tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier également tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail.

Monsieur S. HADDAD professeur à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury.

M^{elle} R. KACHENOURA Maitre de conférence Classe B à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

M^{me} F. MEGHERBI-BITAM professeur à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DÉDICACES

Je dédie ce travail

A ma mère

A la mémoire de mon père

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille et mes amis

SOUAD



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

*A Mes très chers parents. Que dieu leur
procure bonne santé et longue vie*

A mes frères et sœurs

A ma belle famille

*A mon très cher mari que je dois tout Que dieu
réunisse nos chemins pour un long commun serein.*

*A tous les membres de nos familles, petits et
grands*



Nouara



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes éoliens

1. Introduction	3
2. Principe de conversion de l'énergie éolienne.....	3
2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	4
2.1.1 Avantages	4
2.1.2 Inconvénients	4
3. Etat de l'art sur les systèmes éoliens.....	4
3.1. Eoliennes à vitesse fixe.....	5
3.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	5
3.1.2. Machine asynchrone à double stator	6
3.2 Eoliennes à vitesse variable	7
3.2.1 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	8
3.2.2. Machine asynchrone à double alimentation.....	9
A. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	9
B. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer	10
3.2.3. Autres machines.....	11
4. Modélisation de la partie aérodynamique	11
4.2. Modèle du vent	12
4.3. Modèle de la turbine	13
4.2.1 Modèle aérodynamique.....	13
a. La puissance d'une éolienne.....	13
b. La puissance de la turbine	14
c. Le coefficient de puissance	14
5. Conclusion.....	16

Chapitre II : Etude et Modélisation de la MADA

Introduction	18
1. Présentation de système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation	18
1.1 Description de la MADA	19
1.2. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA	19
1.2.1. <i>Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone</i>	19
1.2.2. <i>Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone</i>	20
1.2.3. <i>Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone</i>	20
1.2.4. <i>Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone</i>	21
1.3. <i>Avantages et inconvénients de la MADA</i>	21
1.3.1. <i>Avantages de la MADA</i>	21
1.3.2. <i>Inconvénients de la MADA</i>	22
2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice	22
2.1. Hypothèses simplificatrices	22
2.2. Référentiel de travail	23
2.2.1. <i>référentiel lié au stator</i>	24
2.2.2. <i>référentiel lié au rotor</i>	24
2.2.3. <i>référentiel lié au champ tournant</i>	24
2.3. Modèle de la MADA dans le repère a,b,c	24
2.3.2. Equations électriques dans le repère a, b, c	25
2.3.3. Equations magnétiques dans le repère a, b, c	26
2.3.4. Equation mécanique	27
2.4. Modèle de la MADA dans le repère d, q	28
2.4.2. Application de transformation de Park à la MADA	28
2.4.3. Equations électriques dans le plan d et q	29
2.4.4. Equation du couple électromagnétique et puissance dans le plan dq:	30
3. Conclusion	31

Chapitre III : Commande en Puissance de la MADA

Introduction	32
1. Commande vectorielle de la MADA.....	32
1.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	33
1.2.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques	33
1.2.3. Expression des puissances active et réactive statoriques :.....	34
1.2.4. Expression des tensions rotoriques.....	35
2. Commande vectorielle directe et indirecte.....	36
2.2. Commande indirecte	36
2.2.1. Commande en boucle ouverte	36
2.2.2. Commande en boucle fermée.....	37
3. Mise en place d'un régulateur proportionnel-intégral PI.....	38
3.1 Dimensionnement du régulateur PI.....	38
3.1.2. Synthèse de régulateur PI pour le contrôle des puissances	40
4. Mise en place d'un régulateur RST.....	42
4.1. Principe de base et notation	42
4.2. Structure du régulateur RST	43
4.2.1. Définition.....	43
4.2.2. Synthèse du régulateur RST.....	45
4.2.2.1. Résolution de l'équation de Bezout :.....	46
4.3 Application de la commande RST à la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA)	49
5. Conclusion.....	51

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des Résultats

Introduction	51
1. Résultats de simulation de la commande de la MADA par le régulateurs PI.....	51
1.1. Test de suivi de consigne	51
1.1.1. Interprétation des résultats :	53

1.2.	Sensibilité aux perturbations	53
1.2.1.	Interprétation des résultats :	55
1.3.	Test de robustesse	56
1.3.1.	Interprétation des résultats :	57
2.	Résultats de simulation de la commande de la MADA ; comparaison entre les régulateurs PI et RST.....	57
2.1.	Suivi de consigne	57
2.1.1	Interprétation des résultats	58
2.2.	Sensibilité aux perturbations	58
2.2.1	Interprétation des résultats	59
2.3.	Robustesse	60
2.3.1	Interprétation des résultats	60
3.	Résultats de simulation de la commande de la MADA associée à une turbine éolienne (MPPT) avec les régulateurs PI et RST	61
3.1.	Interprétation des résultats	63
4.	Conclusion.....	64
	Conclusion générale.....	65
	Références Bibliographies	
	Annexes	

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and rounded ends. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards at the ends. The text is centered within the scroll.

Introduction Générale

Introduction générale

La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables. Plusieurs sources d'énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche dont le but de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique [1], [2].

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels : la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodes de contrôle des turbines à vitesse variable. Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse de vent d'une autre part [3].

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation.

Le premier chapitre est consacré à la description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie. Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans ce document. Ceci est suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés. Une modélisation de la turbine éolienne sera présentée.

Le deuxième chapitre consiste à présenter des généralités et une modélisation de la MADA. Il s'agit d'une étude assez détaillée de cette machine (l'écriture de ses équations électriques, magnétiques et de son couple à l'aide de la transformation de Park) en vue d'une commande vectorielle, ainsi une présentation de ses différents modes de fonctionnement existants (moteur et génératrice en hypo et hyper synchrone).

Le troisième chapitre met en œuvre la commande vectorielle basée sur deux régulateurs linéaires de philosophies différentes pour la commande de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en génératrice (un régulateur proportionnel intégral utilisé comme référence et un régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles).

Enfin, le chapitre quatre, on simule la machine asynchrone à double alimentation seule avec un échelon des puissances active et réactive comme références, utilisant un régulateur PI. Ensuite, on refait la même simulation en utilisant un régulateur RST. Les résultats de simulation de notre étude sont présentés, permettant une étude comparative des régulateurs utilisés. Ces deux régulateurs seront comparés en termes de poursuite de trajectoire, robustesse et sensibilité aux perturbations.

Une troisième simulation intégrant la MADA et la MPPT où la puissance active de référence est générée par la MPPT. Des résultats de simulation sont présentés avec les deux régulateurs PI et RST.

Ce travail est clôturé par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs, mettant en relief les principaux enseignements et des perspectives espérées sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the text.

Chapitre I
Etat de l'Art sur les
Systemes Eoliens

1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [4]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les systèmes éoliens et donner quelques définitions sur ces systèmes à travers les équations et concepts physiques régissant leur fonctionnement.

2. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

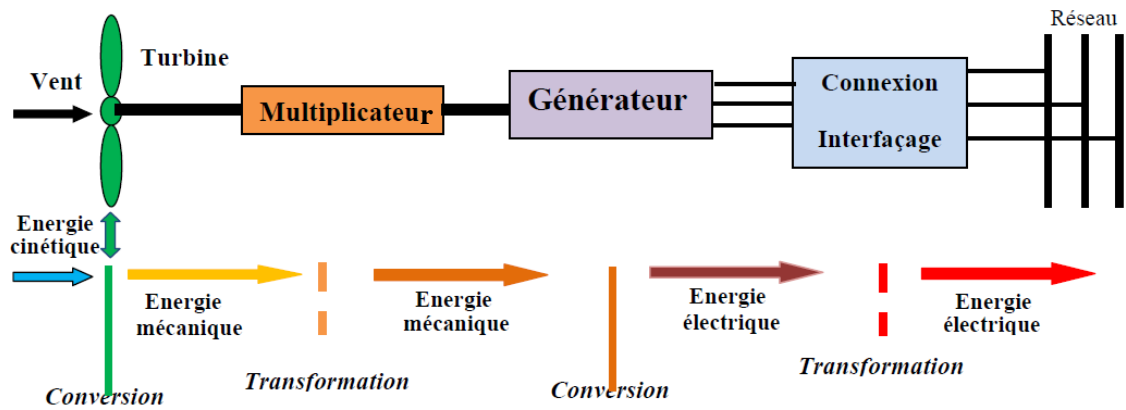


Figure. I.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

2.1.1 Avantages [5]

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

2.1.2. Inconvénients [5]

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

3. Etat de l'art sur les systèmes éoliens

Dans cette partie, nous dresserons une liste du système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone. Nous avons subdivisé ces systèmes en deux grandes

familles ; il s'agit des éoliennes fonctionnant à vitesse fixe et celles fonctionnant à vitesse variable.

3.1. Eoliennes à vitesse fixe

3.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les premières éoliennes de grandes puissances mises en œuvre, reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (figure I.2). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. [6], [7].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche de synchronisme (point $g=0$)[8]. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure I.2).

La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la (voir la figure I.2) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

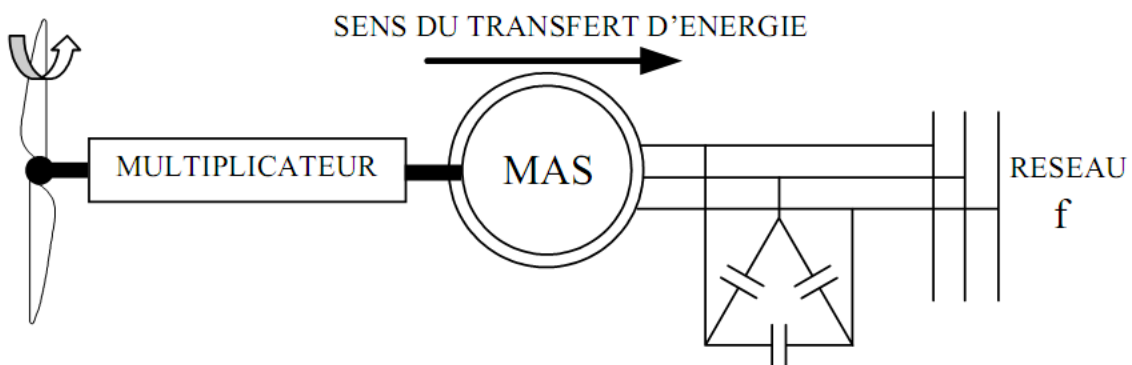


Figure I.2 : Eolienne à base d'une MAS connecté réseau

Parmi ses avantages [5] :

- ✓ Elles possèdent un système électrique simple, car elles n'ont pas besoin d'un système de commande ;
- ✓ Elles ont une très grande fiabilité ;
- ✓ Il ya peu de probabilités d'excitation de fréquence de résonance des éléments d'une éolienne ;
- ✓ Elles sont moins chères.

Ses inconvénients sont :

- ✓ La puissance extraite est non optimisée ;
- ✓ La nécessité de maintenance de la boîte à vitesse ;
- ✓ Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive ;
- ✓ La magnétisation de la machine est imposée par le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses du vent élevées. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse du vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

3.1.2 Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (voir la figure I.3).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses du vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [9].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

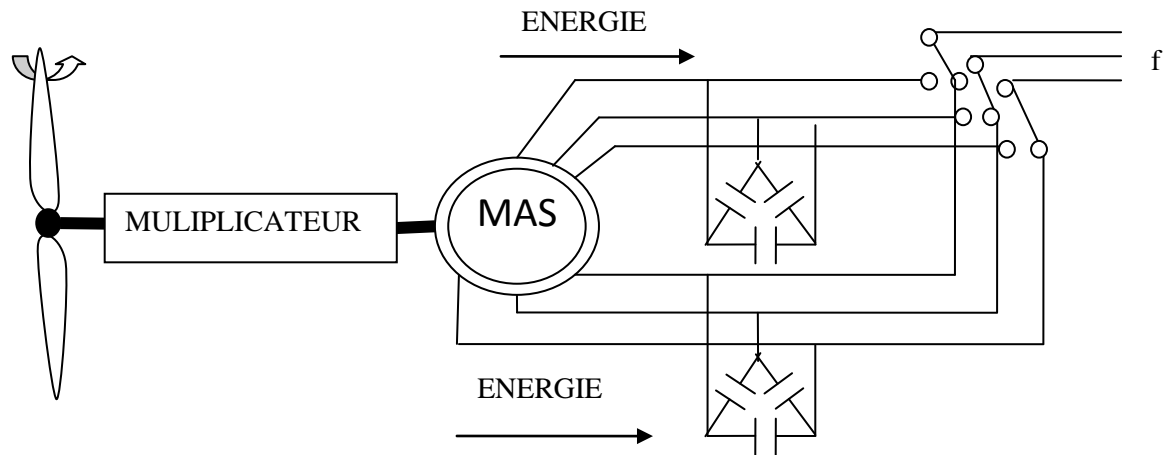


Figure I.3:Éolienne à base d'une machine asynchrone à double stator

3.2 Éoliennes à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, d'un multiplicateur, d'un générateur et d'un convertisseur électronique de puissance destiné à assurer les conditions de couplage au réseau.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparées aux éoliennes à vitesse fixe sont les suivants [7], [10] :

- ✓ Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité ;
- ✓ Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique) ;
- ✓ Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses du vent élevées. En conséquence pour de faibles vitesses de vent, l'angle de d'orientation des pales devient fixe ;
- ✓ Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance (vitesse lente) ;
- ✓ Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique ;
- ✓ Elles sont moins exigeantes en termes d'entretien.

Ses inconvénients sont : [5], [10]

- ✓ Utilisation de machines spéciales ;
- ✓ Convertisseur de puissance complexe ;
- ✓ Nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence ;
- ✓ Gestion de transfert de puissance entre le redresseur MLI et l'onduleur (régulation du bus continu) et le placement au point de puissance optimale de l'éolienne.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent à vitesse variable.

3.2.1 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interfaced'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la figure I.4. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. L'onduleur permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de 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. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur présenté par la figure I.5.

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine, le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie [1], [11]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

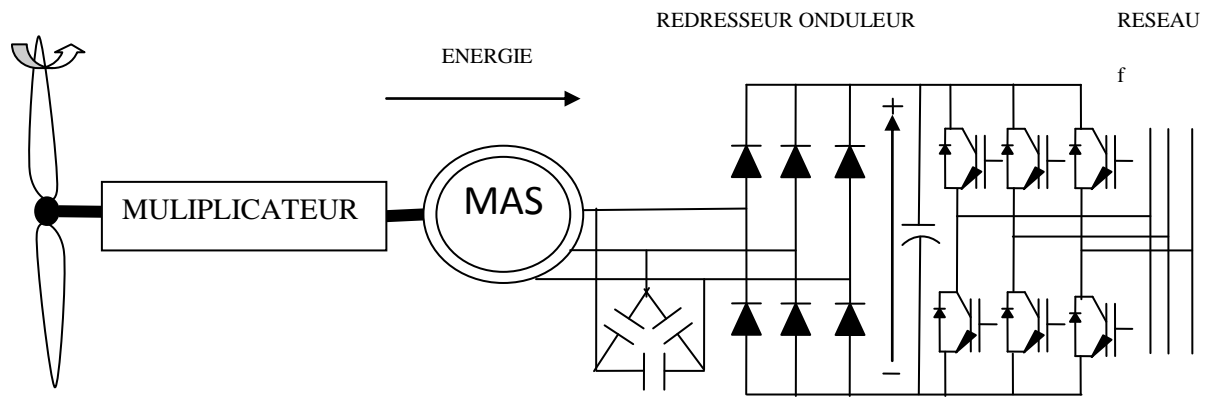


Figure I.4 : Eolienne basé sur une machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensembledredresseur – onduleur

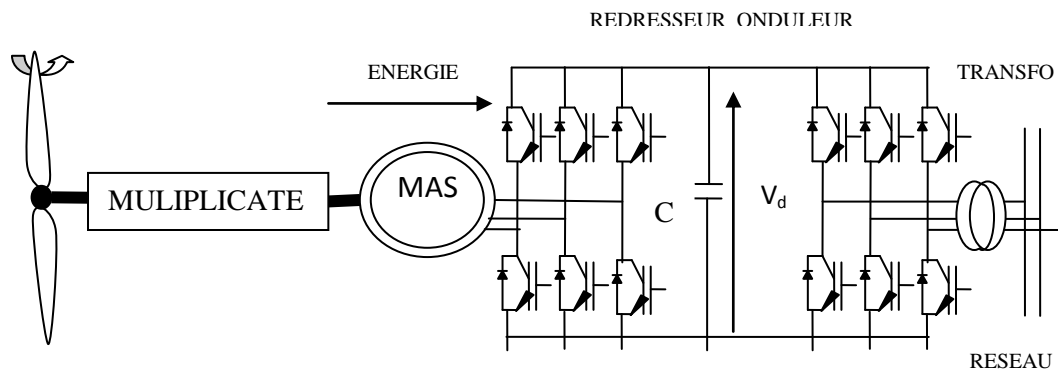


Figure I.5 : Eolienne basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

3.2.2. Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine à rotor bobiné, elle présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones à cage et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. La MADA fera l'objet d'une étude détaillée dans les chapitres II, III et IV de ce mémoire.

A. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.6, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou à GTO [1],[12].

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [13], [14].

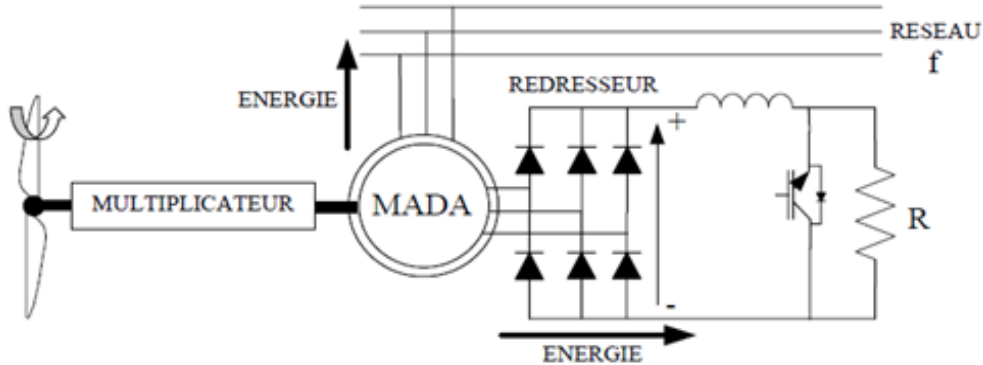


Fig. I.6 : Eolienne basé sur une MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

B. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, figure I.7) [1], [15].

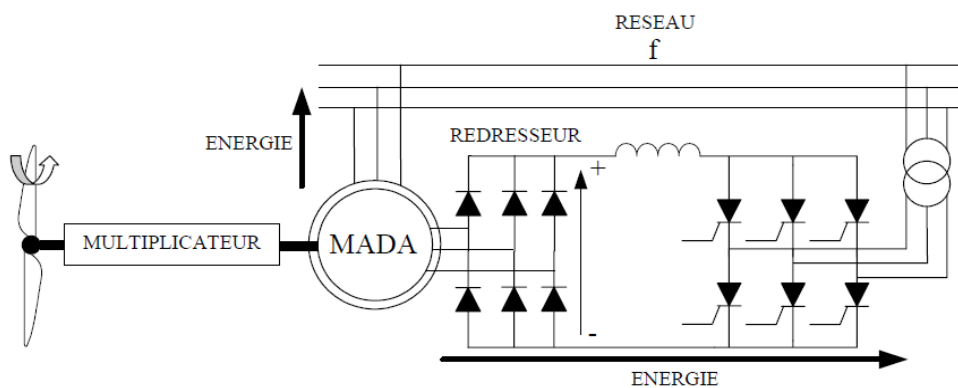


Fig. I.7 : Eolienne basée sur une MADA, structure de Kramer

C. Machine asynchrone à double alimentation-structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Le schéma de la figure I.8 montre la structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. Cette structure possède le net avantage de permettre un transfert bidirectionnel de puissance [1],[16].

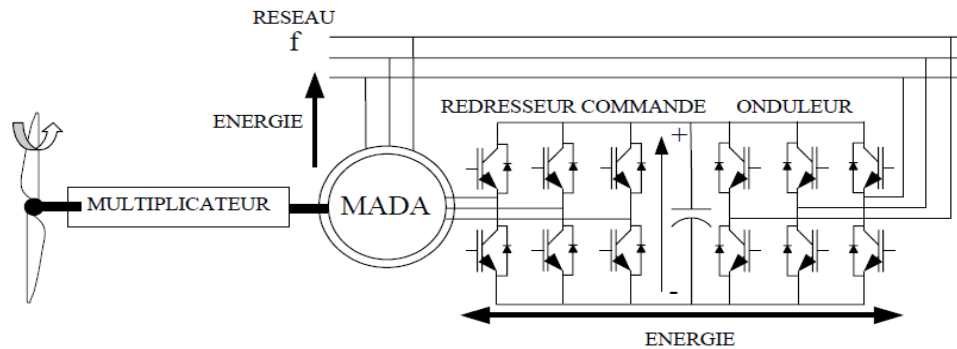


Fig. I.8 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

3.2.3. Autres machines

D'autres types de machines sont très utilisées notamment dans les éoliens à vitesse variable. Les machines synchrones sont utilisées dans la plus part des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrale thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500kW à 2MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge mais elles chères et ont un grand poids.

Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machines pourrait être un candidat de futures éoliennes [1], [5], [17].

4. Modélisation de la partie aérodynamique

L'énergie éolienne utilise la turbine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [18], cette dernière est couplée avec une génératrice électrique pour convertir l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique, ce couplage mécanique peut être soit directe si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisée par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Plusieurs machines sont disponibles sur le marché éolien [20].

La figure I.9 illustre le modèle global du système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissance au réseau électrique. Ce modèle comprend : la turbine éolienne, la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) et de convertisseurs de puissance qui permettent de relier le rotor au réseau électrique.

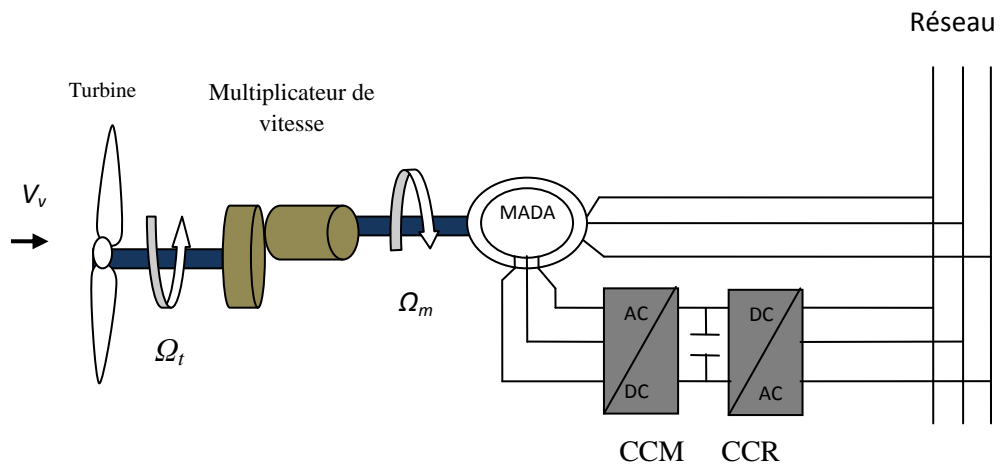


Figure I.9 : Structure générale du système à étudier

Dans cette partie, nous intéresserons uniquement à la modélisation de la turbine éolienne.

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne [18].

4.2. Modèle du vent

La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la voilure éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Dans ce travail le modèle choisi est sous forme de :

$$V_v = A + \sum_{i=0}^n (a_n \sin(b_n \omega_v t)) \quad (\text{I-1})$$

Avec :

A : est une constante.

a_n, b_n, ω_v : Représentent respectivement l'amplitude et la pulsation de l'échantillon du vent [18].

4.3. Modèle de la turbine

4.2.1 Modèle aérodynamique

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t , qui entraînera une génératrice (dans notre cas c'est la MADA) à travers un multiplicateur de vitesse, de gain G . La figure I.10 montre le schéma d'une turbine éolienne.

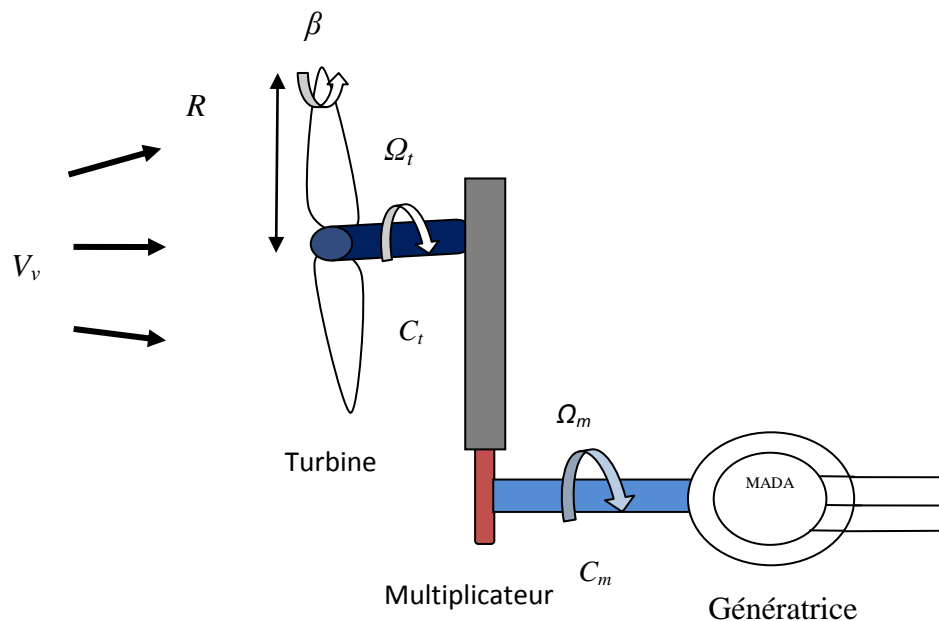


Figure I.10 : Schéma de la turbine éolienne

a. La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante[21]:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad (\text{I-2})$$

Avec :

ρ : La densité de l'air qui est égale à 1.22Kg/m^3 à la pression atmosphérique et à 15°C .

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_v : La vitesse du vent (en m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

b. La puissance de la turbine

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de puissance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_t = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{I-3})$$

C_p : coefficient de puissance ;

β : angle d'orientation des pales ;

λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales $\Omega_t \cdot R$, et la vitesse du vent V_v [22].

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{I-4})$$

Ω_t : Vitesse de la turbine.

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_v^2}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{I-5})$$

c. Le coefficient de puissance

Cette relation a été démontrée par Albert Betz dès 1919, d'où son nom. La valeur du coefficient de puissance $C_p = 16/27$, est une limite maximale du rendement des éolienne qui est, en général, loin d'être atteinte et c'est cette limite théorique (appelée limite de Betz) qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse du vent donnée.

Le coefficient de puissance C_p diffère pour chaque éolienne, il dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et de la vitesse du vent [22] :

$$C_p(\lambda, \beta) = [0.35 - 0.00167(\beta - 2)] \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{I-6})$$

La courbe qui illustre le coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative $C_p=f(\lambda)$ et pour différentes valeurs de l'angle d'inclinaison des pales β_i représentée par la figure I.11.

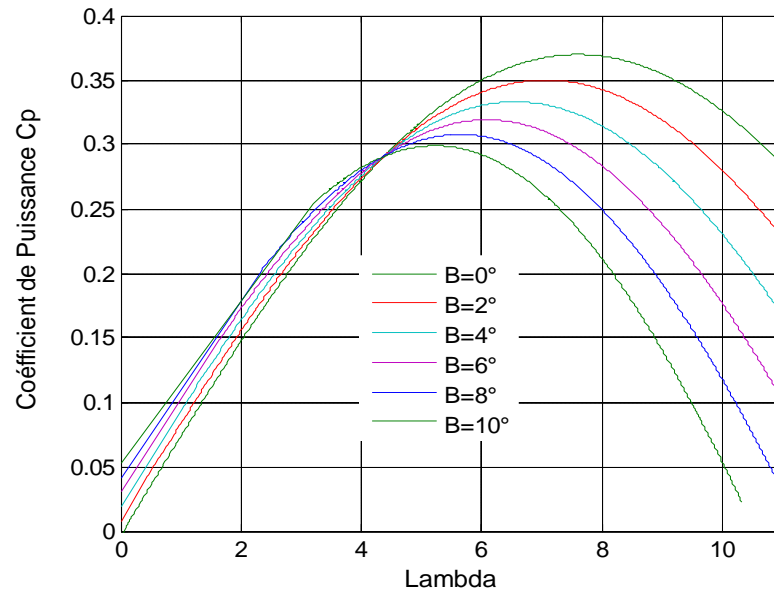


Figure I.11 : Variation de coefficient de puissance en fonction de Lambda λ pour différents valeurs de l'angle de calage β

4.2.2 Modèle de la partie mécanique

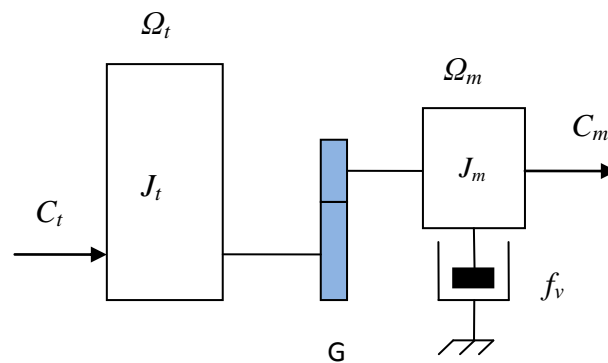


Figure I.12 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec :

J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne,

J_m : le moment d'inertie de la MADA,

f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA,

C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA,

Ω_m : la vitesse de rotation de la MADA.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (voir la figure I.12). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes [23] :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{I-7})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{I-8})$$

D'après la figure I.12, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left[\frac{J_t}{G^2} + G_m \right] \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

C_{em} : le couple électromagnétique de la MADA.

Le schéma bloc de la figure I.13 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales, soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent V_v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

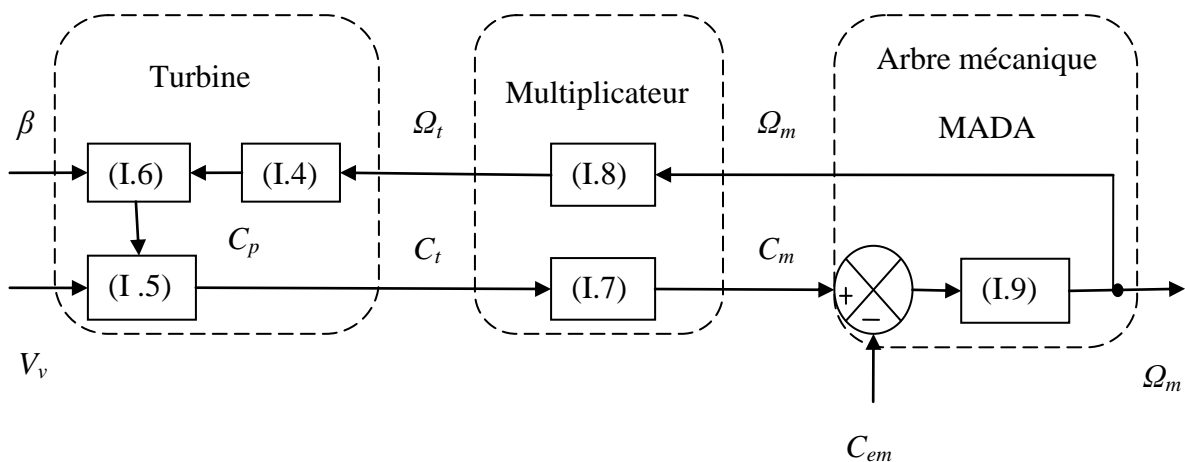


Figure I.13 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents systèmes utilisant la machine asynchrone soit en vitesse fixe ou en vitesse variable ainsi que les différentes structures de la machines asynchrone à double alimentation. L'objectif du projet consiste à utiliser la commande en puissance de cette dernière.

La seconde partie a présenté la modélisation du système éolien, en passant par le modèle aérodynamique dont l'expression de la vitesse du vent, à celui de la partie mécanique du système qui nous ont permis d'établir l'équation dynamique de l'arbre mécanique et nous ont permis de présenter le schéma bloc de la modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

A decorative graphic of a scroll with a white background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top edge curving upwards and the bottom edge curving downwards. The text is centered on the scroll.

Chapitre II
Etude et Modélisation
de la MADA

Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent les différentes technologies de génératrices éoliennes proposées sur le marché dont les éoliennes à base des génératrices asynchrones à double alimentation qui permet le fonctionnement sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude sur la machine asynchrone à double alimentation MADA, concernant sa structure, son principe et mode de fonctionnement, afin d'évaluer les qualités apportés par cette machine.

Ensuite, la mise sous forme d'un modèle mathématique de la machine est nécessaire pour son étude et sa commande dans les différents régimes de fonctionnement. On s'intéresse essentiellement à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) afin d'élaborer un modèle simple qui nous permettra de décrire le comportement de cette machine.

1. Présentation de système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation

Actuellement la majorité des progrès éoliens (supérieur à 1MW) reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). La MADA n'est qu'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par le stator et le rotor. Ce dispositif permet le fonctionnement à vitesse variable et a l'avantage d'utiliser un convertisseur dimensionné seulement à un tiers de la puissance fournie (30% de la puissance nominale fournie au réseau)[24].

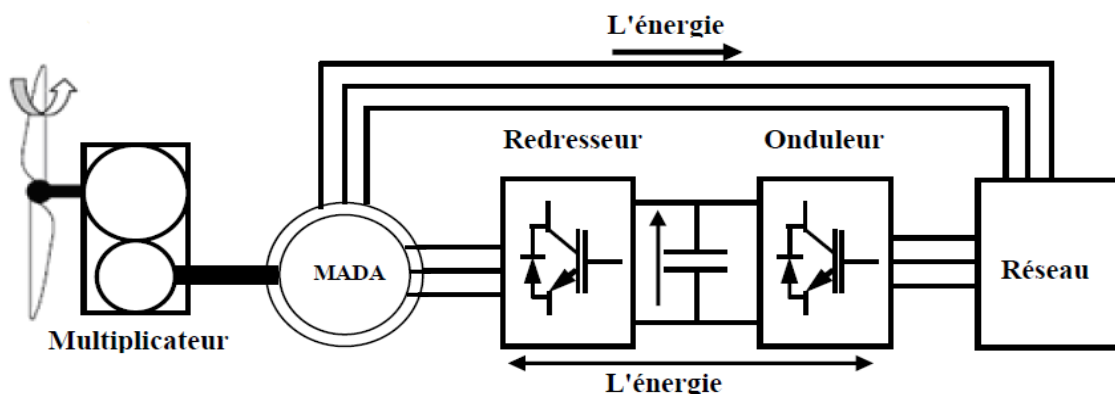


Figure. II.1 : Eolienne à base d'une MADA à vitesse variable

Dans notre travail, on s'intéressera uniquement à la modélisation et la commande de la MADA au mode génératrice, la modélisation de l'interface électronique ne sera pas abordé.

1.1 Description de la MADA

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation "*doubly-fed induction machine* (DFIM) ", date de l'année 1899 ; il ne s'agissait pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation.

Pour être classée comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération à vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator [4], [24].

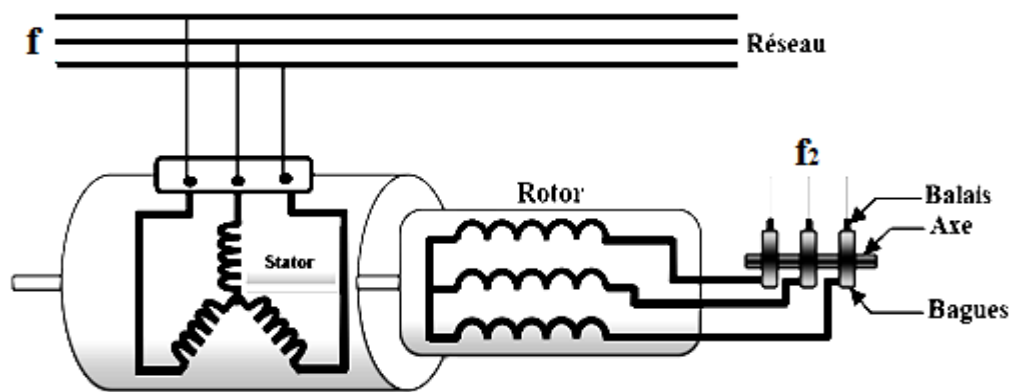


Figure.II.2 : Schéma d'une MADA à rotor bobiné

1.2. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au-dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [13], [26].

1.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. Cette puissance est dissipée en

perles joule dans le cas des machines asynchrones à cage [26]. Ce type de fonctionnement est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse en dessous de vitesse de synchronisme.

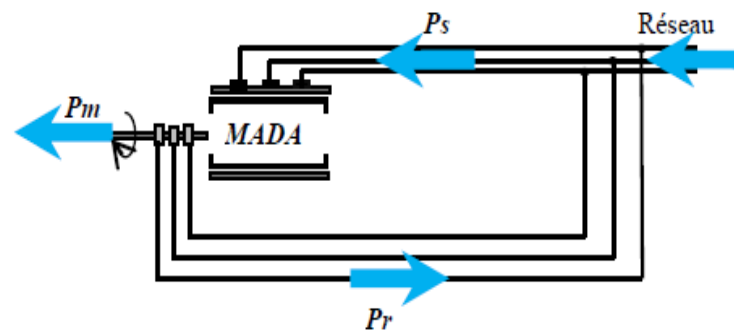


Figure. II.3 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

1.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est également fournie par le réseau, dans ce régime, la machine asynchrone à cage classique ne peut pas fonctionner. Ce type de fonctionnement est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse au-dessus de vitesse de synchronisme [13], [26].

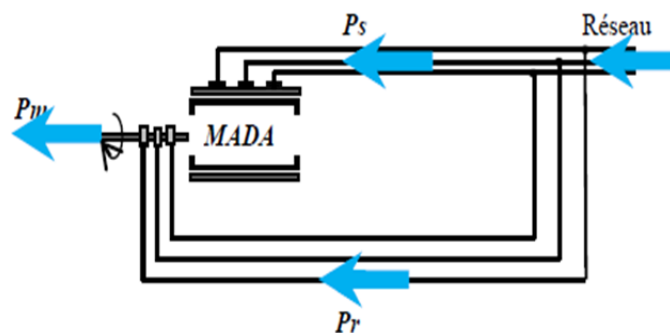


Figure. II.4 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

1.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator, et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [26]. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

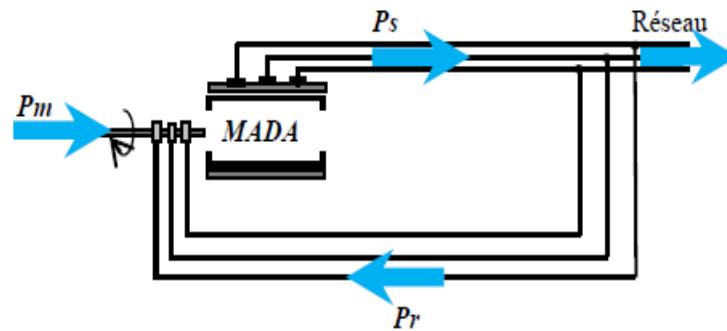


Figure.II.5 : Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

1.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Dans ce régime, la machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement [13], [26]. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

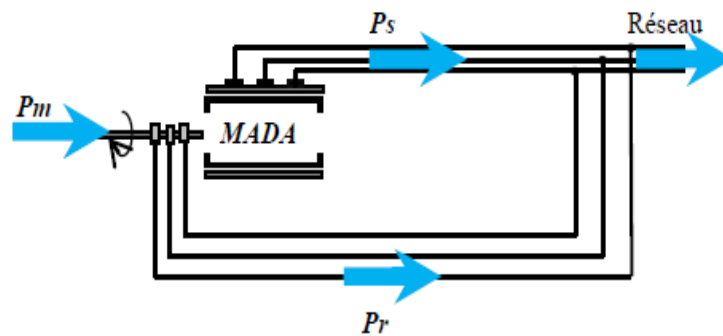


Figure.II.6 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

1.3. Avantages et inconvénients de la MADA

1.3.1. Avantages de la MADA [24]

- ✓ L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (Courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ✓ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- ✓ En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.

- ✓ La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- ✓ Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- ✓ Le fonctionnement en hypo-synchrone ou hyper-synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- ✓ La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - Régulation découplée des puissances active et réactive.

1.3.2. Inconvénients de la MADA [22]

- ✓ Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- ✓ Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus grand que celle de la machine classique.
- ✓ Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- ✓ Une commande plus complexe.

Pour bien exploiter la machine à double alimentation dans un tel domaine d'utilisation, la modélisation est nécessaire. Dans la suite de ce chapitre, le travail sera consacré à la modélisation de la MADA.

2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice

Dans cette partie, le travail que nous allons présenter, concerne la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne et fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'extraire à tout instant le maximum de la puissance quelle que soit la vitesse du vent.

2.1. Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle de la MADA, en vue de sa commande, on prend quelques hypothèses simplificatrices, qui sont [27], [28], [29]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La machine est symétrique.

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté il en résulte que les pertes fer et pertes par hystérésis (les courants de Foucault) sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans chaque phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

2.2. Référentiel de travail

Un référentiel de travail est un système d'axe associé à sa vitesse de rotation. Ce changement de repère de travail a pour but de simplifier les équations, en rendant notamment la matrice inductance à coefficients constants.

Les équations de la MADA peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié. Il existe trois choix importants, on peut fixer le référentiel (d, q) :

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant

On définit :

ω_s : Vitesse du champ tournant ou pulsation des courants statoriques.

ω_r : Vitesse électrique du rotor (rd/s).

$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$: Glissement.

$g \cdot \omega_s$: Pulsations des courants rotoriques.

On pose : $\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_r$

2.2.1. référentiel lié au stator

Ce référentiel est utilisé pour étudier les variations importantes de la vitesse rotation.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 ; \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

2.2.2. référentiel lié au rotor

Ce référentiel est lié au rotor, donc il tourne à la même vitesse que lui. Un observateur placé sur ce référentiel verrait la vitesse de rotation constante. Ce référentiel est donc préférable pour l'étude des systèmes où la vitesse de rotation peut être considérée comme constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$$

2.2.3. référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est lié au champ tournant, donc il tourne à la vitesse de synchronisme. Il est préférable pour l'étude des systèmes où la fréquence d'alimentation est constante. Il est aussi utilisé dans l'alimentation des moteurs à fréquence variable, lorsque l'on désire étudier sa fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = g \omega_s , \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. vu l'avantage qu'importe ce dernier référentiel, nous allons l'utiliser dans la suite de notre travail.

2.3. Modèle de la MADA dans le repère a,b,c

L'enroulement des trois phases statoriques et rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué dans la figure(II.7) :

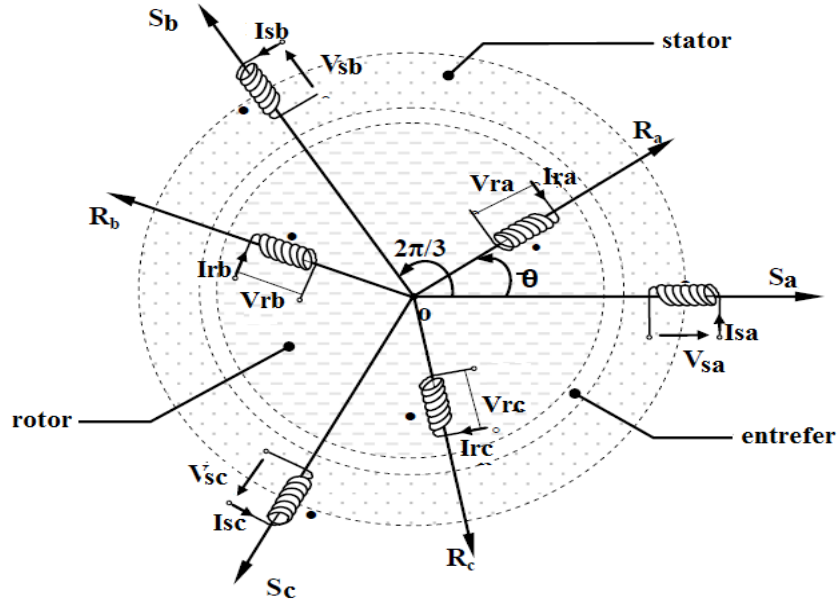


Figure II.7 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.

2.3.2. Equations électriques dans le repère a, b, c

Le modèle de la MADA comporte trois équations statoriques et trois équations rotoriques :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d}{dt} \varphi_{as} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d}{dt} \varphi_{bs} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d}{dt} \varphi_{cs} \end{cases} \quad (\text{II -1})$$

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{cases} \quad (\text{II -2})$$

Les équations de la MADA peuvent être représentées sous forme matricielle comme suit :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II -3})$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II -4})$$

$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]$, $[V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]$; Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]$, $[I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]$; Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]$, $[\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]$; Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

R_s et R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

2.3.3. Equations magnétiques dans le repère a, b, c

Coté stator

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II -5})$$

Coté rotor

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II -6})$$

Les équations en notation matricielles :

Coté stator

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II -7})$$

Coté rotor:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II -8})$$

L_s : inductance propre de la phase statorique.

L_r : inductance propre de la phase rotorique.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II -9})$$

M_s : Inductance mutuelle entre phases statorique.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_{sr} et M_{rs} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$$[Msr] = [Mrs] = Msr \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

En remplaçant le flux par ses expressions dans les équations (II-1) et (II-2), on obtient :

Au stator

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [RS] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [L_s] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [Msr] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

Au rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = [Rr] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [L_r] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [Mrs] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

2.3.4. Equation mécanique

$$C_{em} - C_m = J \frac{d}{dt} \Omega + f\Omega \quad (\text{II-13})$$

J : moment d'inertie des masses tournantes (Kg.m^2) ;

f : Coefficient de frottement en (Nm.s/rad) ;

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA en (Nm) ;

C_m : Couple moteur fourni par l'organe d'entraînement en (Nm) ;

Ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor.

2.4. Modèle de la MADA dans le repère d, q

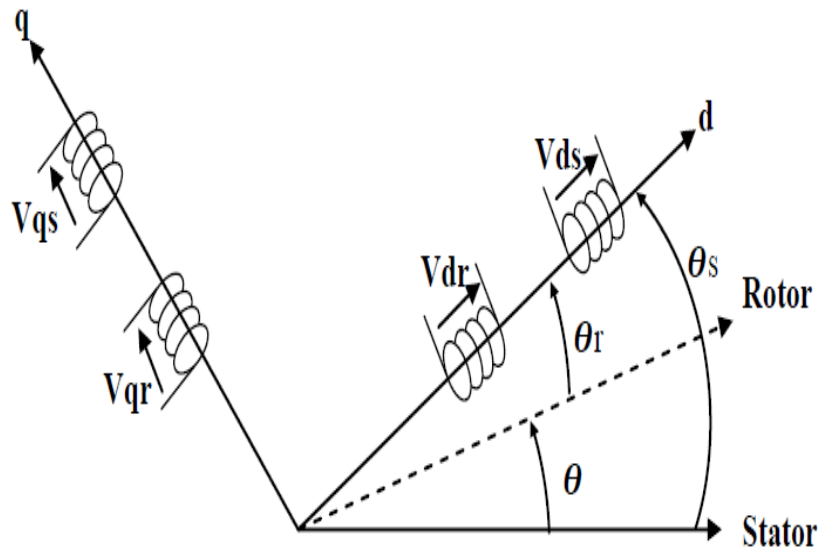


Figure II.8 : Représentation de la MADA dans les deux repères.

2.4.2. Application de transformation de Park à la MADA

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c en un système équivalent à deux enroulements biphasés tournants d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan d, q . La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles.

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$p(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Son inverse est donnée par :

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

2.4.3. Equations électriques dans le plan d et q

En appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électrique pour le stator, on aura :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \varphi_{qs} \frac{d}{dt} \theta_s \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \varphi_{ds} \frac{d}{dt} \theta_s \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} \frac{d}{dt} \theta_r \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} \frac{d}{dt} \theta_r \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

Avec :

V_{ds} et V_{qs} : Les tensions statoriques dans le repère dq.

V_{dr} et V_{qr} : Les tensions rotoriques dans le repère dq.

I_{ds} et I_{qs} : Les courants statoriques dans le repère dq.

I_{dr} et I_{qr} : Les courants rotoriques dans le repère dq.

φ_{ds} et φ_{qs} : Les flux statoriques dans le repère dq.

φ_{dr} et φ_{qr} : Les flux rotoriques dans le repère dq.

R_s et R_r : Les résistances respectives des bobinages statoriques et rotoriques.

θ_s et θ_r : Les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les relations entre les flux et les courants sont exprimées par les équations suivantes :

$$\text{Flux coté stator : } \begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Flux coté rotor : } \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

A partir des équations (II-18) et (II-19), on peut déduire les équations des courants statoriques et rotoriques :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{dr} \quad (\text{II-20})$$

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{qr} \quad (\text{II-21})$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{ds} \quad (\text{II-22})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{qs} \quad (\text{II-23})$$

Après développement des calculs et en choisissant les courants statoriques et rotoriques comme variables d'état, nous obtenons le système d'équations (II-24) :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{dr} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma L_s} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{dr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} i_{qr} \omega_r \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qr} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma L_s} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{ds} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{qr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} i_{dr} \omega_r \\ \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{ds} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + \left(\frac{1}{\sigma L_r} \omega_r - \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_s \right) i_{qr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} i_{qs} (\omega_r + \omega_s) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qs} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{qr} + \left(-\frac{1}{\sigma L_r} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} i_{ds} (\omega_r - \omega_s) \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

2.4.4. Equation du couple électromagnétique et puissance dans le plan dq:

L'équation du couple peut s'écrire :

$$c_{em} = p \cdot M_{sr} (I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \quad (\text{II-25})$$

Avec p est le nombre de paires de pôles de la machine.

Les équations des puissances active et réactive statoriques et rotoriques sont représentées par :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{II-26})$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (\text{II-27})$$

$$P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \quad (\text{II-28})$$

$$Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \quad (\text{II-29})$$

3. Conclusion

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé, dans lequel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans lequel les équations sont devenues à coefficients constants dans le temps. Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle en puissance de la MADA.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the text.

Chapitre III
Commande en Puissance
de la MADA

Introduction

La génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande vectorielle est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode moteur pour une éolienne à vitesse variable ; comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive.

Le travail que nous allons présenter dans ce chapitre, concerne la commande en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne et fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'extraire à tout instant le maximum de la puissance quelle que soit la vitesse du vent.

Parmi les nombreuses stratégies de commande existantes, nous avons choisi la commande à flux statorique orienté. Ce choix aboutit à des expressions simples de puissances actives et réactive ce qui facilite le travail de synthèse des régulateurs. Ce chapitre est organisé comme suit :

Après présentation du modèle de la MADA avec orientation du flux statorique, nous exposerons les différents développements théoriques relatifs à la commande en puissance qui nous mènera à des schémas de la commande directe ou indirecte soit en boucle ouverte ou fermée. Afin de mieux régler les puissances actives et réactives de la MADA on utilise deux synthèses de régulateurs : PI et RST pour ensuite faire la comparaison des performances de la commande par ces derniers.

1. Commande vectorielle de la MADA

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par une orientation adéquate du repère (d, q). Si cela est réalisé, nous obtiendrons un comportement proche de celui d'un moteur à courant continu à excitation indépendante ou nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone à double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [30]

1.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [13]. Le système d'équations décrivant la machine asynchrone à double alimentation est donné par :

1.2.1. Equations des tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \varphi_{qs} \omega_s \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

En choisissant le référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique φ_s avec l'axe d : $\varphi_{ds} = \varphi_s$, $\varphi_{qs} = 0$

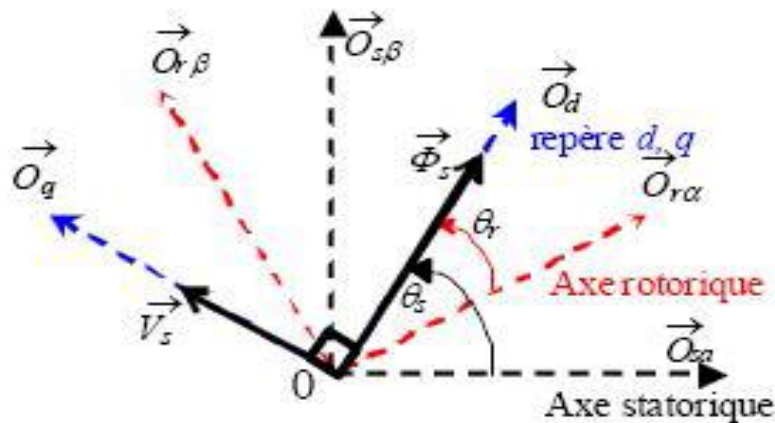


Figure III.1 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique

Les équations (III.1) peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [13] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \varphi_s \omega_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \varphi_{qr} (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \varphi_{dr} (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

1.2.2. Equations des flux

Les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

1.2.3. Expression des puissances active et réactive statoriques :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec un flux statorique orienté, ce système d'équation peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Les puissances actives P_s et réactives Q_s sont donc en fonction des courants statoriques sur lesquels nous n'avons aucune action directe. Nous devons chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques. A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = - \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Remplaçant l'équation (III.7) dans (III.6) on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Avec } V_{qs} = V_s = \varphi_s \omega_s \rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

1.2.4. Expression des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (III.7) les expressions des flux rotorique s'écrivent

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})I_{dr} + \frac{M_{sr}V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})I_{qr} \end{cases} \quad (III.9)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques on aboutit au système suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = [R_r + (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})p]I_{dr} - g \omega_s (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = [R_r + (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})p]I_{qr} + g \omega_s (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

A partir des systèmes d'équations (III.8) et (III.11) nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle de puissances tel qu'il est présenté dans le schéma bloc ci – dessous :

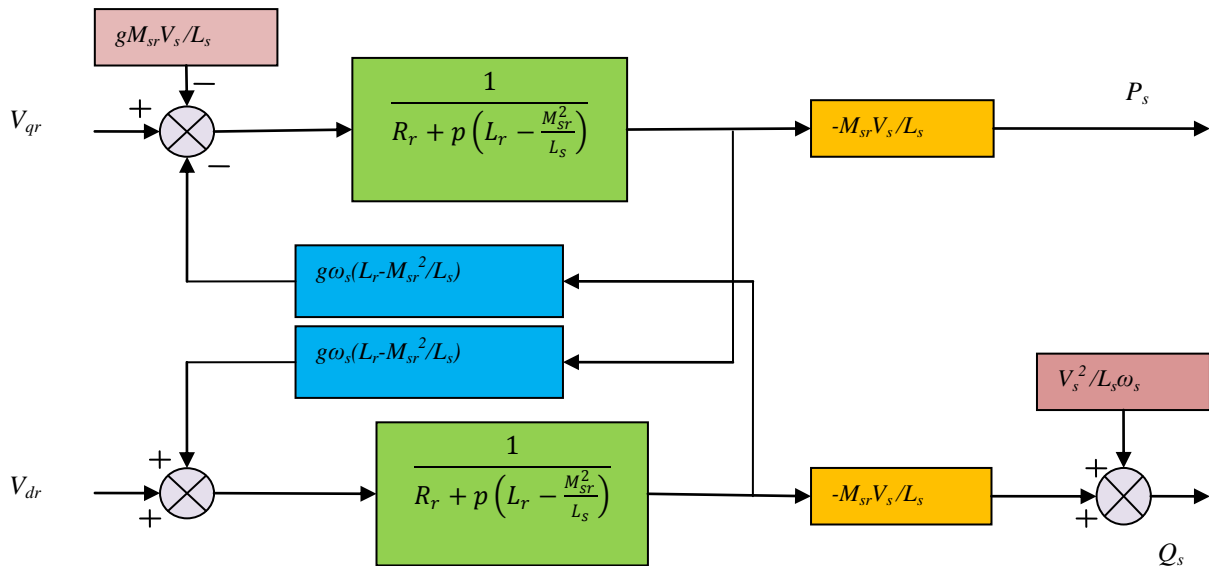


Figure III.2 : Schéma bloc du système à régler

2. Commande vectorielle directe et indirecte

2.1 Commande directe

Elle consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. L'intérêt que présente cette méthode est la simplicité de sa mise en œuvre.

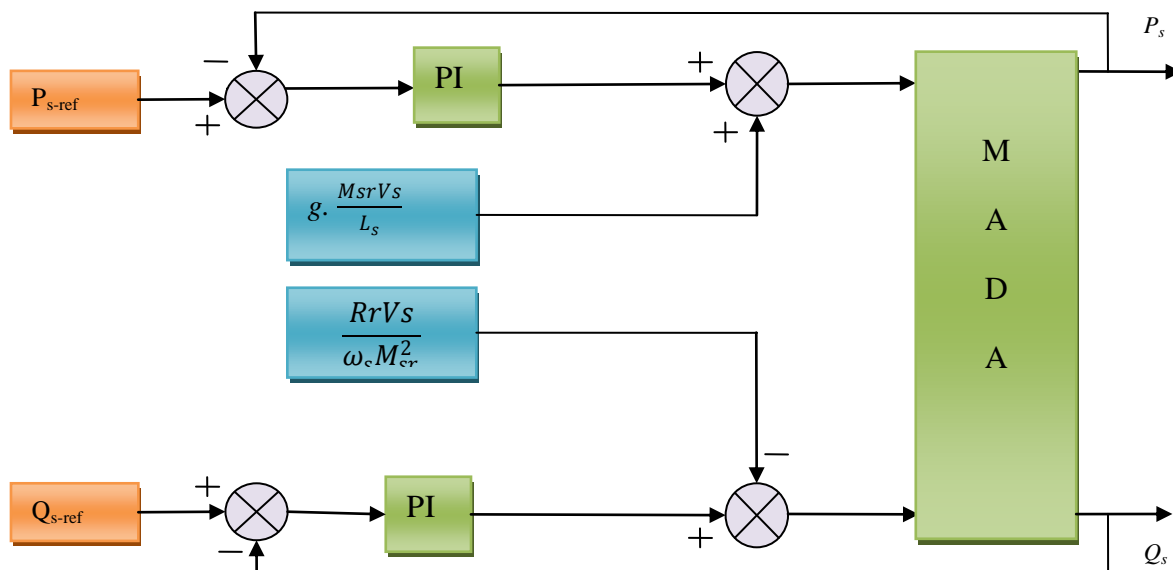


Figure III.3 : Schéma de principe de la commande directe

2.2. Commande indirecte

La commande indirecte consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Elle a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants [30].

2.2.1. Commande en boucle ouverte

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance est représenté sur la figure III.4. Ce schéma consiste à contrôler les puissances indirectement par le réglage des deux composantes directes et en quadrature des courants rotoriques par des régulateurs PI dont les consignes sont déduites directement des valeurs de puissances que l'on veut imposer à la machine.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

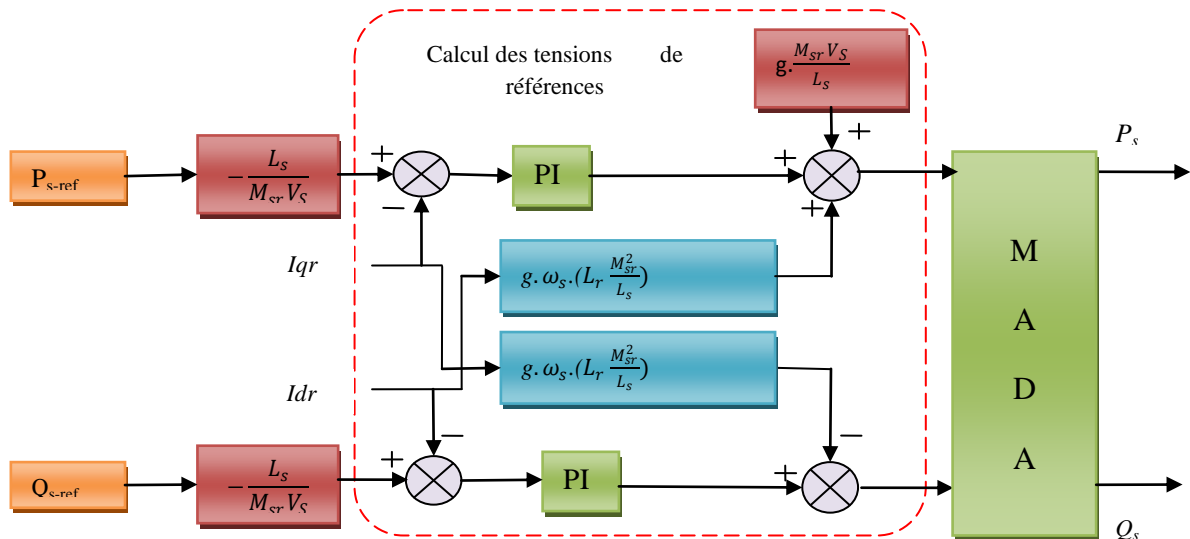


Figure III.4 : Schéma de principe de la commande indirecte en boucle ouverte

2.2.2. Commande en boucle fermée

La figure III.5 représente le schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance sur lequel on a incorporé une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système [13].

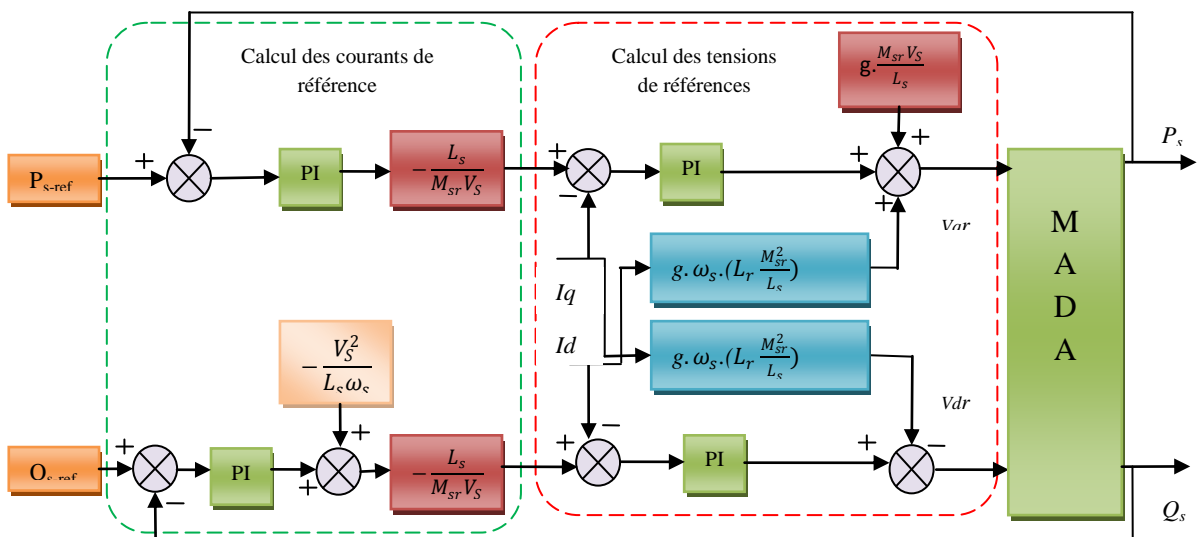


Figure III.5 : Schéma de principe de la commande indirecte en boucle fermée

La mise en équation du modèle de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans la partie précédente. Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande ainsi que les résultats de simulation.

Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur Proportionnel – Intégral est réalisée. Ce type de régulateur est le plus utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels. Afin de comparer ses performances à d'autres régulateurs plus élaborés, nous effectuons également la synthèse d'un régulateur RST.

3. Mise en place d'un régulateur proportionnel-intégral PI

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle P assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent.

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} , i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré[31].

3.1 Dimensionnement du régulateur PI

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral PI est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mise en parallèle, sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = Kp + \frac{Ki}{p} \quad (\text{III.12})$$

avec :

Kp : le gain proportionnel du régulateur.

Ki : le gain intégral du régulateur.

3. Synthèse du régulateur PI pour le contrôle du courant

La boucle de régulation des courant I_{qr} et I_{dr} est donnée par le schéma bloc de la figure (III.6)

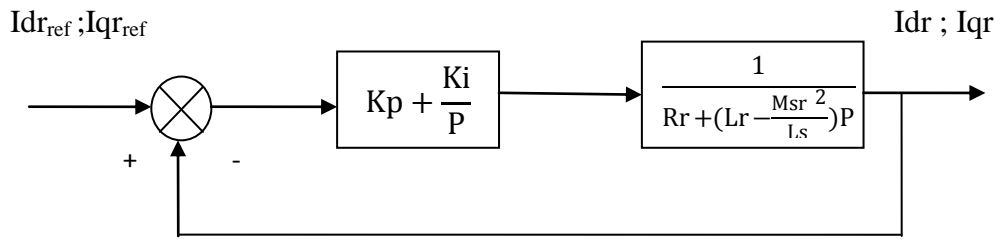


Figure III.6 : Schéma bloc de la boucle de régulation des courants par un régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte du système s'écrit :

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{1}{R_r + (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})P} \quad (III.13)$$

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}}{\frac{R_r}{(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})} + P} \quad (III.14)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui traduit par l'égalité suivante :

$$P + \frac{K_i}{K_p} = P + \frac{R_r}{(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})} \quad (III.15)$$

Alors on a :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})} \quad (III.16)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}}{P} \quad (III.17)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (III.18)$$

$$FTBF = \frac{Kp \cdot \frac{1}{\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}}{1 + \frac{Kp \cdot \frac{1}{\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}}{P}} \quad (III.19)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}{Kp} P} \quad (III.20)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau P} \quad (III.21)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}{Kp} \quad (III.22)$$

τ : désigne le temps de réponse du système, donc les gains du régulateur Kp et Ki peuvent être exprimés en fonction de τ et des paramètres de la machine comme suit :

$$Kp = \frac{\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}{\tau} \quad (III.23)$$

$$\text{et } Ki = \frac{Rr}{\tau} \quad (III.24)$$

3.1.2. Synthèse du régulateur PI pour le contrôle des puissances

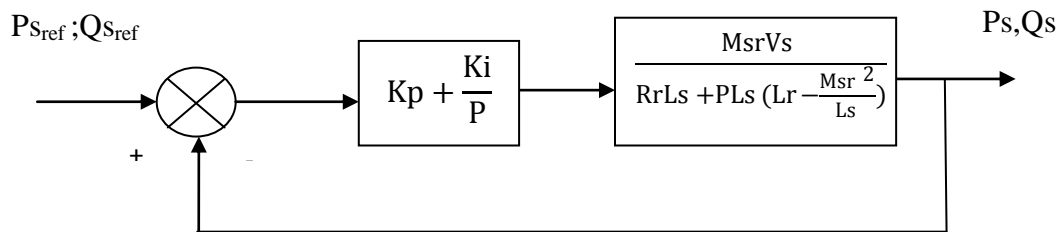


Figure III.7 : Schéma bloc de la boucle de régulation des puissances par un régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte du système s'écrit :

$$FTBO = \frac{P + \frac{Ki}{Kp}}{\frac{P}{Kp}} \cdot \frac{MsrVs}{RrLs + Ls\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)P} \quad (III.25)$$

$$(III.25) FTBO = \frac{P + \frac{Ki}{Kp}}{\frac{P}{Kp}} \cdot \frac{\frac{MsrVs}{Ls\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)}}{\frac{LsRr}{Ls\left(Lr - \frac{Msr^2}{Ls}\right)} + P} \quad (III.26)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui traduit par l'égalité suivante :

$$P + \frac{Ki}{Kp} = P + \frac{Ls Rr}{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})} \quad (III.27)$$

Alors on a :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{Ls Rr}{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})} \quad (III.28)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{Kp \cdot \frac{MsrVs}{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})}}{P} \quad (III.29)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (III.30)$$

$$FTBF = \frac{\frac{Kp \cdot \frac{MsrVs}{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})}}{P}}{1 + \frac{Kp \cdot \frac{MsrVs}{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})}}{P}} \quad (III.31)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau P} \quad (III.32)$$

$$\text{Avec } \tau = \frac{1}{Kp} \cdot \frac{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})}{MsrVs} \quad (III.33)$$

τ : désigne le temps de réponse du système, donc les gains du régulateur Kp et Ki peuvent être exprimés en fonction de τ et des paramètres de la machine comme suit :

$$Kp = \frac{Ls (Lr - \frac{Msr^2}{Ls})}{\tau MsrVs} \quad (III.34)$$

$$\text{Et } Ki = \frac{Ls Rr}{\tau MsrVs} \quad (III.35)$$

4. Mise en place d'un régulateur RST

Issue en partie de la commande adaptative, la commande RST est apparue dans la littérature vers les années 1980[32]. Cette approche a été décrite systématiquement pour la commande numérique, dont le régulateur utilisé se nomme RST, où le nom reflète les trois polynômes qu'il fait intervenir. Le régulateur RST est un algorithme sophistiqué exploitant les ressources numériques dont on dispose et dont la synthèse est purement algébrique [33],[34].

4.1. Principe de base et notation

La figure (III.8) montre le schéma de principe de la commande RST. Schéma de principe puisque les transferts R, S et T sont des polynômes et sont donc non propres.

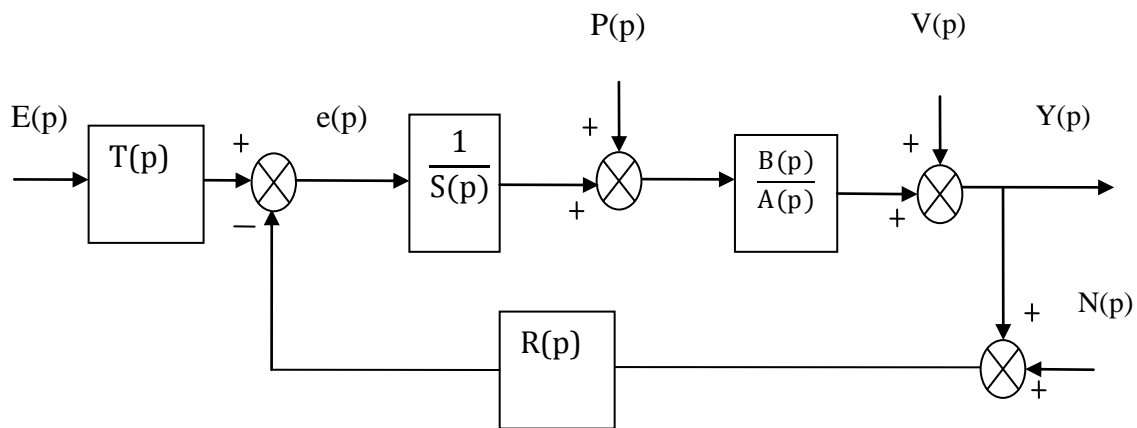


Figure III.8 : Structure d'un régulateur RST

Avec : $\mathbf{E(p)}$: Consigne à suivre.

$\mathbf{P(p)}$: Perturbation agissant sur la commande.

$\mathbf{V(p)}$: Perturbation agissant au niveau de la sortie du procédé.

$\mathbf{N(p)}$: Bruits de mesure.

$\mathbf{Y(p)}$: Sortie du système.

Dans tout ce qui suit, les systèmes peuvent être étudiés en discret (z) ou en continu (p). Pour des raisons de cohérence nous optons pour le système continu.

Comme n'importe quelle structure de correction, le concepteur devra déterminer les paramètres de correction (ici les polynômes R, S et T) pour assurer [32]:

- La stabilité interne.
- Le suivi asymptotique d'une certaine classe de consigne.
- Le rejet asymptotique d'une certaine classe de perturbation
- Un régime transitoire satisfaisant.

Cependant, le respect de ces spécifications n'est pas suffisant pour assurer un fonctionnement satisfaisant de l'installation, il faudra tenir compte :

- ✓ Des saturations du procédé.
- ✓ Du niveau du bruit de mesure.
- ✓ Des erreurs de modélisation.

Le non-respect de ces règles peut nuire au système considéré. Le principe de base des régulateur RST est donc, de calculer les polynômes R,S et T.

4.2. Structure du régulateur RST

4.2.1. Définition

Un régulateur de type RST est un régulateur polynomial qui se présente comme une alternative intéressante aux régulateurs de type Proportionnel - Intégral. C'est une structure à deux degré de liberté car il permet d'assurer des performances différentes pour la régulation et la poursuite [33], Il permet aussi de mieux gérer le compromis rapidité et performances. Les éléments R, S et T sont des polynômes dont le degré est fixé suivant le degré des fonctions de transfert de poursuite et de régulation en boucle ouverte. Ils sont calculés à l'aide d'une stratégie de placement de pôles robustes [13], [36], [37].

Représentation du schéma classique d'un asservissement numérique avec l'élément correcteur:

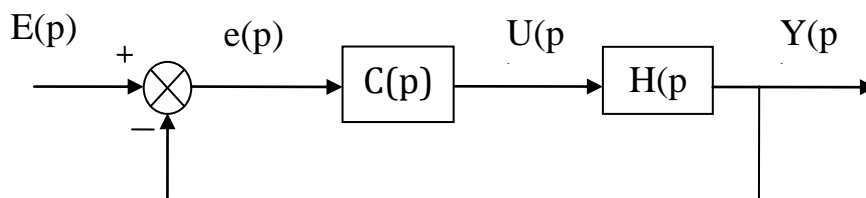


Figure III.9 : Asservissement avec l'élément correcteur

$H(p)$: est la fonction de transfert du système.

Cette stratégie a pour objectif de régler les performances de l'asservissement (temps de réponse, dépassement et réduction de l'effet de la perturbation sur la sortie) à l'aide de deux paramètres de synthèse (T_c , T_f) appelés respectivement horizon de commande et horizon de filtrage à partir desquels on définira les pôles du polynôme de commande et celui de filtrage respectifs [32].

Le choix d'une telle structure peut être justifié du fait qu'elle permet de faire un placement de pôle. Les régulateurs RST peuvent être illustrés par un schéma fonctionnel à trois branches :

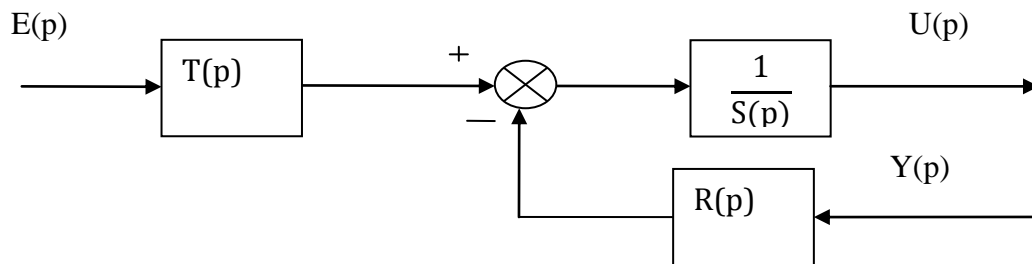


Figure III.10.a : Structure du correcteur RST

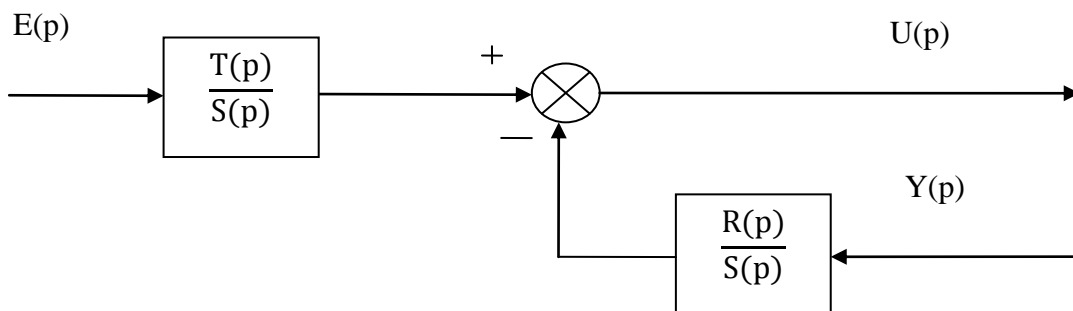


Figure III.10.b : Structure du correcteur RST

Symboliquement, on représente le processus complété par le régulateur RST par le diagramme fonctionnel simplifié suivant :

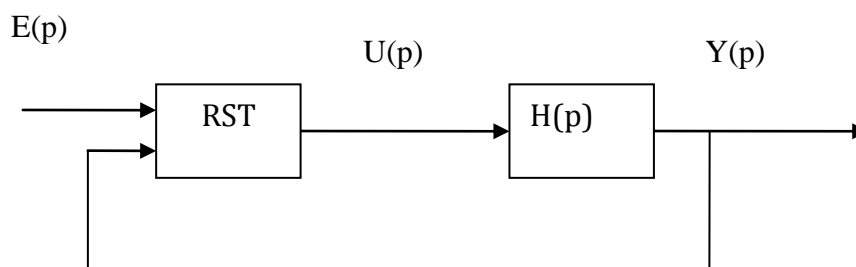


Figure III.10.c : Système avec régulateur RST

Les polynômes $R(p)$, $S(p)$ et $T(p)$ sont respectivement de degré n , m et z .

$$\begin{cases} R = r_n p^n + r_{n-1} p^{n-1} + r_{n-2} p^{n-2} + \dots \dots \dots r_0 \\ S = s_m p^m + s_{m-1} p^{m-1} + s_{m-2} p^{m-2} + \dots \dots \dots s_0 \\ T = t_z p^z + t_{z-1} p^{z-1} + t_{z-2} p^{z-2} + \dots \dots \dots t_0 \end{cases} \quad (III.36)$$

4.2.2. Synthèse du régulateur RST

Soit le système corrigé de la figure III.11 :

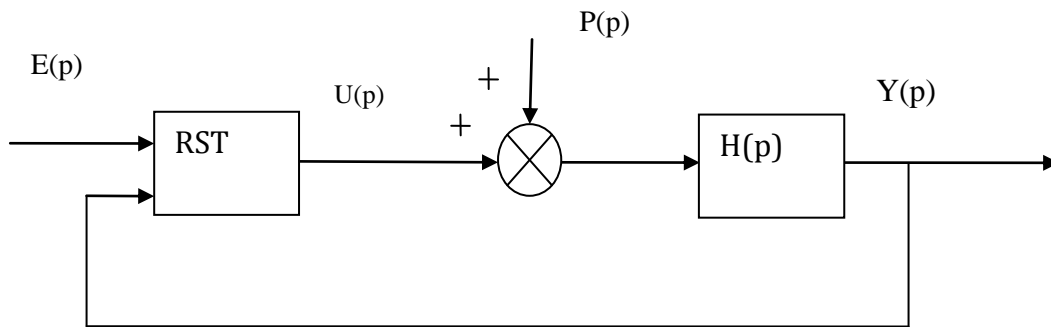


Figure III.11 : Système régulé avec perturbation

L'ensemble du processus compensé par le régulateur RST, a pour fonction de transfert en boucle fermée la forme suivante :

$$Y = \frac{B.T}{A.S+B.R} E + \frac{B.S}{A.S+B.R} P \quad (III.37)$$

Les trois polynômes R , S et T doivent être choisis et dimensionnés afin que cette fonction de transfert en boucle fermée réponde à un modèle de référence, ou le modèle à poursuivre préconisé par l'utilisateur.

Le système corrigé de la figure III.11, a comme fonction de transfert $\frac{B}{A}$, où $E(p)$ représente l'entrée et $P(p)$ la perturbation.

La régulation de ce système en boucle fermée par placement de pôles robustes consiste à placer une fonction de transfert $\frac{R}{S}$ sur la boucle de retour et une fonction de transfert $\frac{T}{S}$ appliquée à la référence où R , S et T sont les polynômes de l'équation III.36. Le schéma fonctionnel correspondant à ce calcul est celui de la figure III.10.b.

Les termes A et B de notre système (MADA) s'écrivent :

$$A = L_s \cdot R_s + p \cdot L_s \cdot \left(L_r - \frac{Msr^2}{L_s} \right) \quad (\text{III.38})$$

$$B = Msr \cdot V_s \quad (\text{III.39})$$

Dans la structure de régulation en boucle fermée (équation (III.37)) on distingue deux fonctions de transfert en poursuite $T_{\frac{Y}{E}}$ et en régulation $T_{\frac{Y}{P}}$.

Où :

$$T_{\frac{Y}{E}} = \frac{B \cdot T}{D} \quad (\text{III.40})$$

$$\text{Et} \quad T_{\frac{Y}{P}} = \frac{B \cdot s}{D} \quad (\text{III.41})$$

$$D = A \cdot S + B \cdot R \quad (\text{III.42})$$

$D(p)$: Polynôme qui définit les pôles du système en boucle fermée [31].

$T(p)$: Polynôme du système introduisant un degré de liberté qui permet de faire la poursuite.

4.2.2.1. Résolution de l'équation de Bezout :

Rappelons que l'équation en boucle fermée donnant les fonctions de transfert en poursuite et en régulation est [38] :

$$Y = \frac{B \cdot T}{A \cdot S + B \cdot R} E + \frac{B \cdot S}{A \cdot S + B \cdot R} P$$

Le principe du placement de pôles consiste à spécifier un polynôme arbitraire de stabilité $D(p)$ de la boucle fermée (correspondant au dénominateur des fonctions de transfert en poursuite et en régulation) et calculer les polynômes $S(p)$ et $R(p)$ conformément à l'équation de Bezout : $D = A \cdot S + B \cdot R$

On suppose que :

- La consigne E et la perturbation P sont des constantes.
- Le rejet de la perturbation P est assuré si et seulement si $S(0) = 0$.

➤ Le gain statique du transfert consigne-sortie est unitaire si et seulement si $T(0) = R(0)$.

Nous remarquons que le polynôme T intervient uniquement dans le transfert consigne sortie.

Il permet de spécifier le comportement dit transfert en poursuite : $T \frac{Y}{E} = \frac{B.T}{D}$

La fonction, de transfert $\frac{B}{A}$ et le régulateur $\frac{R}{S}$ étant strictement propre, le degré de $A.S + B.R$ est déterminé par celui du produit de $A * S$, ce qui donne [13]:

$$\text{deg}(D) = \text{deg}(A.S + B.R) = \text{deg}(A.S) = \text{deg}(A) + \text{deg}(S) \tag{III.43}$$

En supposant que :A est de degré k nous avons :

$$\begin{cases} \text{deg}(D) = 2.k + 1 \\ \text{deg}(S) = \text{deg}(A) + 1 \\ \text{deg}(R) = \text{deg}(A) \end{cases} \tag{III.44}$$

Selon le choix de régulateur que nous avons effectué (strictement propre), on aboutit aux notations suivantes :

$$\begin{cases} A(p) = a_k p^k + a_{k-1} p^{k-1} + \dots \dots \dots a_0 \\ B(p) = b_{k-1} p^{k-1} + b_{k-2} p^{k-2} + \dots \dots \dots b_0 \\ R(p) = r_k p^k + r_{k-1} p^{k-1} + \dots \dots \dots r_0 \\ S(p) = s_{k+1} p^{k+1} + s_k p^k + \dots \dots \dots s_0 \\ D(p) = d_{2k+1} p^{2k+1} + d_{2k} p^{2k} + \dots \dots \dots d_0 \end{cases} \tag{III.45}$$

La résolution de l'équation de Bezout nous ramène au système de Sylvester suivant [05]:

$$\begin{bmatrix} a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & a_1 & b_1 & 0 & 0 & \cdot & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & a_1 & a_0 & 0 & \cdot & \cdot & b_1 & b_0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & a_1 & a_0 & b_{k-1} & \cdot & \cdot & b_1 & b_0 \\ a_k & \cdot & \cdot & \cdot & a_1 & 0 & b_{k-1} & \cdot & \cdot & b_1 \\ 0 & a_k & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & b_{k-1} & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & a_k & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 & b_{k-1} & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & a_k & \cdot & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{k-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_{k+1} \\ r_0 \\ r_1 \\ \cdot \\ r_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{2k} \\ d_{2k+1} \end{bmatrix} \tag{III.46}$$

Conformément à la stratégie du placement des pôles robustes, le degré de D nous oblige à placer trois pôles.

Le polynôme est décomposé en deux polynômes C et F où $D = C.F.$ dans ce cas, nous définissons deux paramètres :

Un horizon dit de commande T_c .

Un horizon dit de filtrage T_f .

D'où :

$P_c = -\frac{1}{T_c}$: pôle du polynôme de commande C .

$P_f = -\frac{1}{T_f}$: pôle du polynôme de filtrage F .

Le rôle du polynôme de commande étant d'accélérer le système, on fait notre choix de façon arbitraire, 3 à 5 fois supérieur au pôle du polynôme A [38]. Et dans le but d'accroître la robustesse du régulateur, nous avons tout intérêt à dés équilibrer les horizons T_c et T_f de plus, afin de rendre la commande moins sensible aux différents bruits pouvant être amené notamment par les capteurs. Pour cela, nous choisissons $T_c = 3 * T_f$ [13].

Nous pouvons associer à T_c et T_f un certain nombre de règles simples que nous allons énumérer [39] :

- ✓ Si le temps de réponse en asservissement est trop grand, diminué T_c ,
- ✓ Pour augmenter la robustesse et la marge de stabilité, augmenter T_c ou T_f ou les deux,
- ✓ Nous avons souvent intérêt à déstabiliser les horizons T_c et T_f pour accroître la robustesse,
- ✓ Si la commande est trop sensible aux bruits des capteurs, augmenter T_f ,
- ✓ Si la commande est très sollicitée en mode asservissement, augmenter T_c , ou prévoir un pré-filtrage adoucisseur de la référence.

4.3 Application de la commande RST à la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA)

➤ Cas des puissances active et réactive

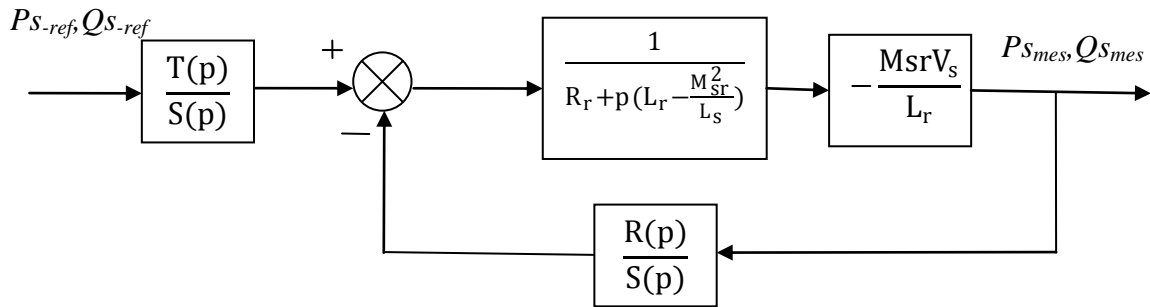


Figure III.12 : Structure du régulateur RST pour la puissance active

Les polynômes A et B étant :

$$B(p) = Msr \cdot V_s \tag{III.47}$$

$$A(p) = L_s \cdot R_s + p \cdot L_s \cdot \left(L_r - \frac{Msr^2}{L_s} \right) \tag{III.48}$$

Le polynôme A est de degré $k=1$, et tenant compte de l'équation (III.9) on déduit que [40], [41] :

$$\begin{cases} deg(R) = 1 \\ deg(S) = 2 \\ deg(D) = 3 \end{cases} \tag{III.49}$$

Le polynôme D est défini comme suit :

$$D = C \cdot F = (p - p_c) \cdot (p - p_f)^2 \tag{III.50}$$

Où : p_c et p_f sont les pôles du polynôme de commande C et pôle du polynôme de filtrage F respectifs.

$$\begin{bmatrix} S_2 \\ S_1 \\ r_1 \\ r_0 \end{bmatrix} = \text{inv} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{bmatrix} \tag{III.51}$$

D'où on retrouve après application numérique les polynômes RST :

$$S(p) = 4.9904.10^4 p^2 + 1.5513.10^5 p$$

$$R(p) = 2.5872.10^5 p + 3.9618.10^7$$

$$T(p) = R(0) = r_0 = 1.9618.10^7$$

La figure de la page suivante représente le schéma global de la commande RST pour une machine asynchrone double alimentée.

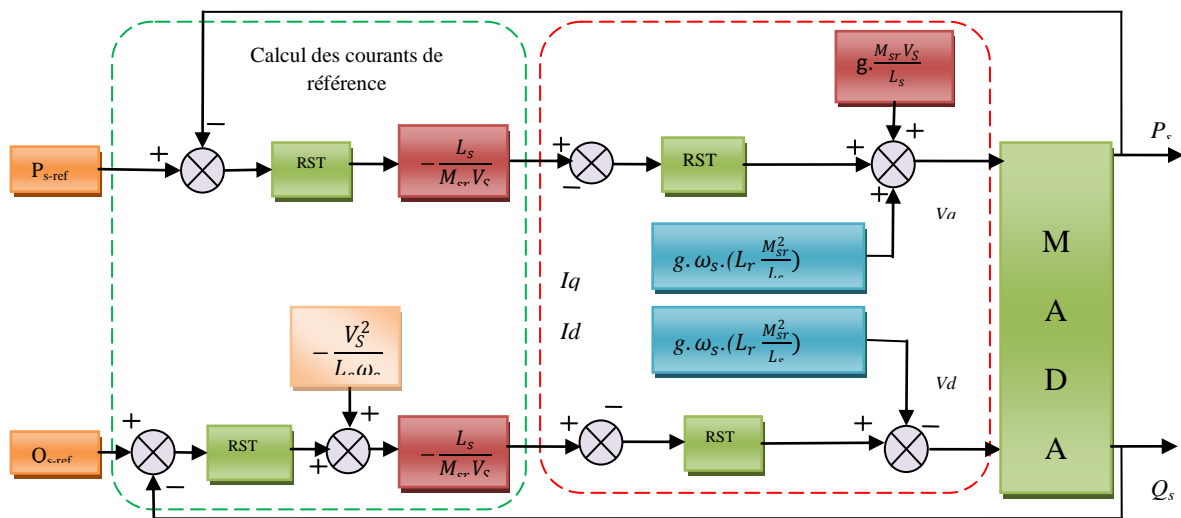


Figure III.13 Schéma de principe de la commande indirecte en boucle fermée.

5. Conclusion

Dans Ce chapitre nous nous sommes intéressés à la commande en puissance de la MADA soit par le régulateur PI ou par RST.

Nous avons commencé par choisir le modèle la MADA avec orientation du flux statorique. Ce choix de référentiel a permis de mettre en œuvre une commande vectorielle menant à exprimer les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques qui nous a permis d'établir les schémas blocs du système a réglé soit par la commande directe ou indirecte.

Ensuite nous avons présenté la synthèse des deux régulateurs afin de contrôler les puissances actives et réactives de la MADA par les deux régulateurs PI et RST par la méthode indirecte. Les performances de cette dernière munie de ses régulateurs sont testées par simulation dans le chapitre IV.

A decorative border resembling a scroll, with a grey shaded area at the top right corner and a vertical scroll-like element on the left side.

Chapitre IV
Simulation et Interprétation
des Résultats

Introduction

La mise en équation de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive ainsi que la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande ont été mise en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la présentation des résultats de simulation de la commande indirecte en boucle fermée avec les deux régulateurs PI et RST.

Des simulations sont réalisées pour comparer ces régulateurs en termes de suivi de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse vis à vis des variations de paramètres.

1. Résultats de simulation de la commande de la MADA par le régulateurs PI

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de tests par simulation effectués sur une machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 10kW dont les paramètres sont donnés en **annexe B**. Cette phase consiste à montrer les résultats de simulation de la commande indirecte réalisée par l'usage du régulateur PI, en appliquant des échelons de la puissance active et réactive pour les valeurs de référence.

Pour analyser les performances de la stratégie de commande proposée, nous avons effectué trois tests : un test de suivi de consigne, un test de régulation en puissance de la MADA. Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement, ainsi, un test de robustesse.

Dans le but de mieux apprécier les performances de ce régulateur, les simulations effectuées dans cette section ne tiennent pas compte des modèles des convertisseurs.

1.1. Test de suivi de consigne

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 1337tr/min.

Pour la puissance active :

De $t=0s$ à $t=3s$: un échelon négatif de -4000 W

De $t=3s$ à $t=5s$: un échelon négatif de -7500 W

Pour la puissance réactive :

De $t=0s$ à $t=4s$: un échelon de 0VAR

De $t=4s$ à $t=5s$: un échelon positif de 2000VAR

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus pour le régulateur PI.

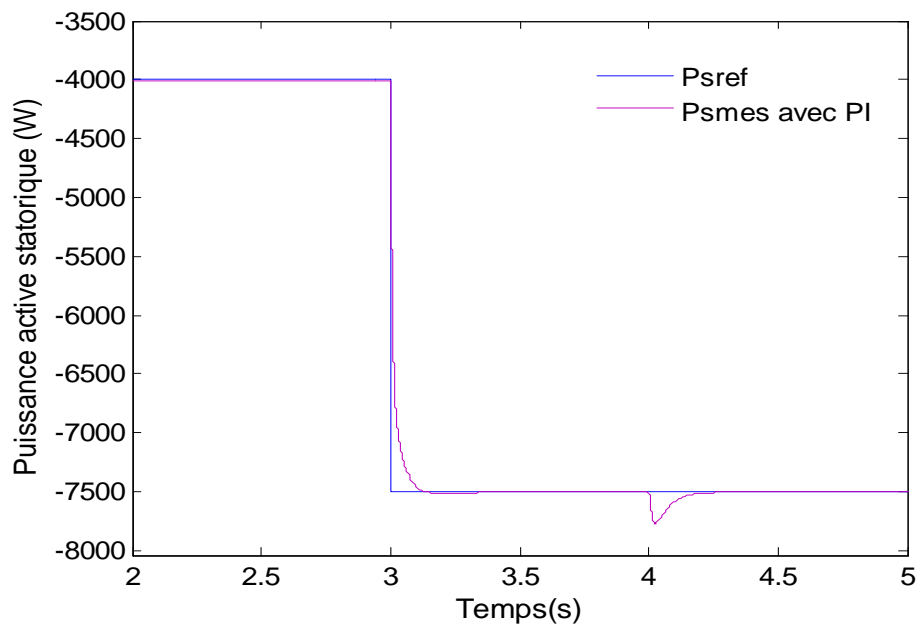


Figure IV.1 : Suivi de consigne pour la puissance active statorique.

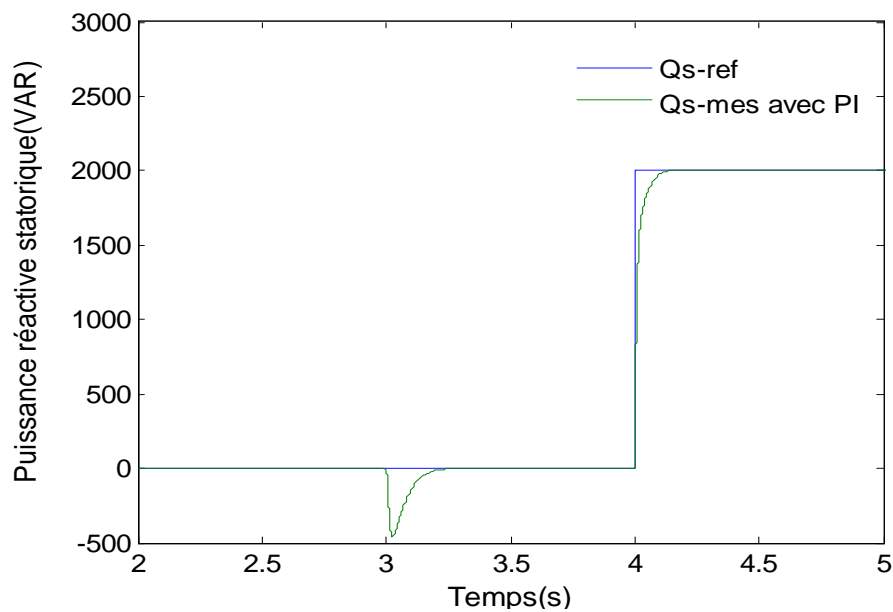


Figure IV.2 : Suivi de consigne pour la puissance réactive statorique.

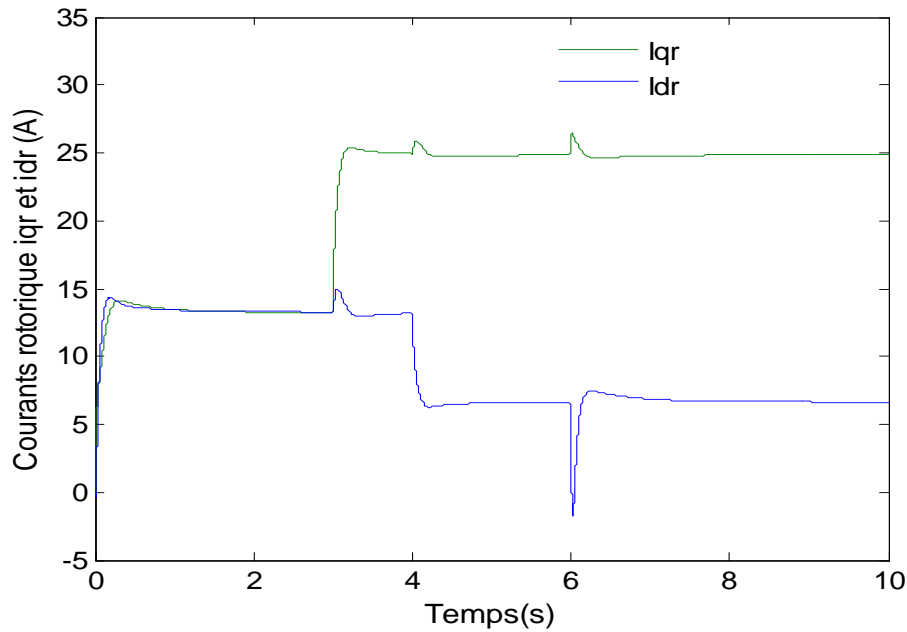


Figure IV.3: Courants rotoriques direct et quadrature de la MADA avec PI.

1.1.1. Interprétation des résultats :

Les figures (IV.1) et (IV.2) présentent les résultats obtenus pour le test de suivi de consigne dans le cas de stratégie de commande par régulateur PI. Pour cet essai, la vitesse est fixée à 1337tr/mn, nous appliquons des échelons de puissance active et réactive ($P_{s-ref} = -7.5kW$ et $Q_{s-ref} = 2kVAR$) aux instants $t = 3s$ et $t = 4s$ respectivement. A la figure (IV.3) sont montrés les courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} de la MADA. Les puissances Q_s et P_s suivent parfaitement l'évolution des courants I_{dr} et I_{qr} respectivement, car dans ce mode de contrôle (contrôle indirect), les puissances statoriques ne sont pas mesurées mais est plutôt reconstruites à partir des courants rotoriques.

Il est à souligner qu'à l'instant $t = 3s$ la puissance réactive réagit au changement de la valeur de la puissance active de référence, et à l'instant $t = 4s$ la puissance active également réagit au changement de la valeur de la référence réactive.

1.2. Sensibilité aux perturbations

Cet essai consiste à faire varier la vitesse de rotation de la machine brusquement à $t = 6s$ ou elle passe de 1337 à 1548tr/min tout en laissant les puissances actives et réactives constantes et on vérifie dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne.

Pour la puissance active :

De $t = 0s$ à $t = 3s$: un échelon négatif de $-4000 W$

De $t = 3s$ à $t = 5s$: un échelon négatif de $-7500 W$

Pour la puissance réactive :

De $t=0s$ à $t=4s$: un échelon de 0 VAR

De $t=2s$ à $t=5s$: un échelon positif de 2000VAR

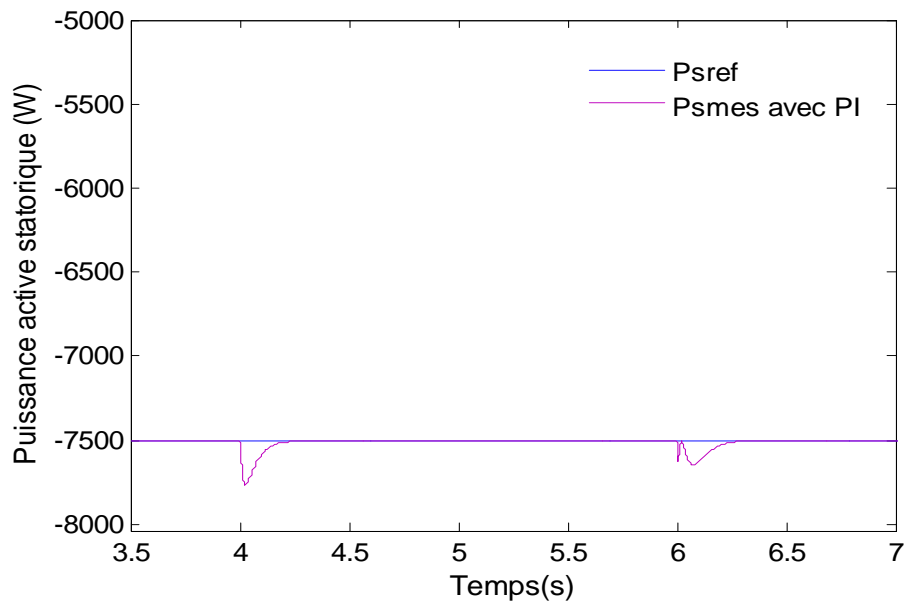


Figure IV.4 : Effet de la variation de la vitesse sur la puissance active statorique.

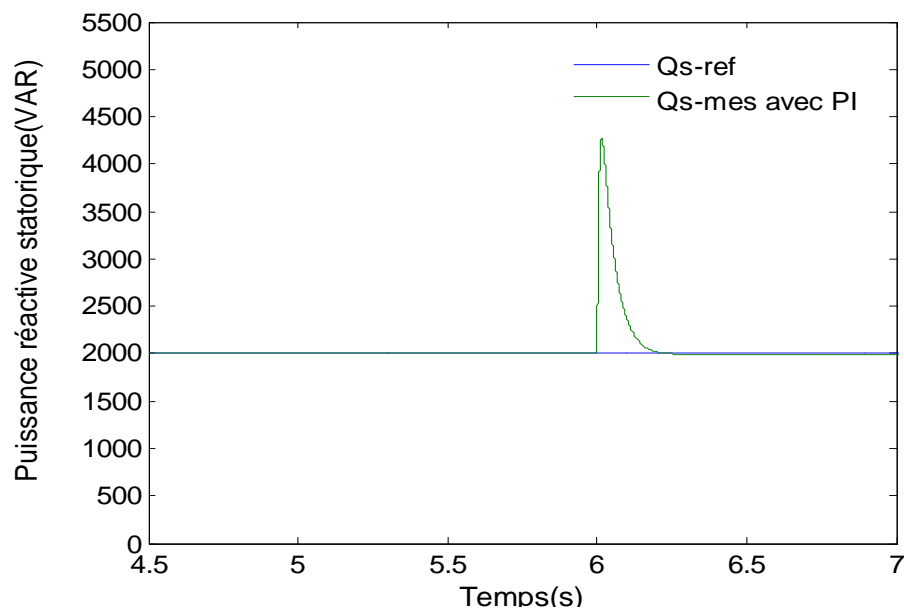


Figure IV.5 : Effet de la variation de la vitesse sur la puissance réactive statorique.

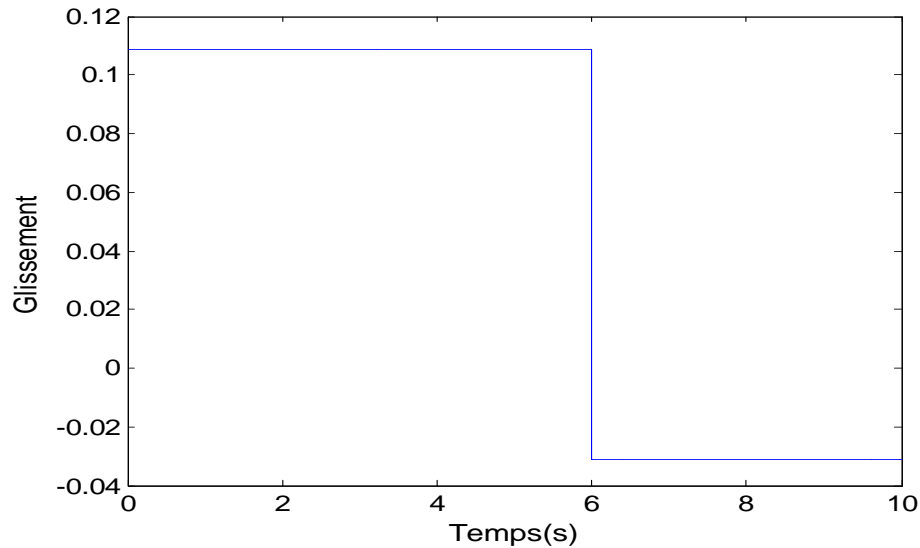
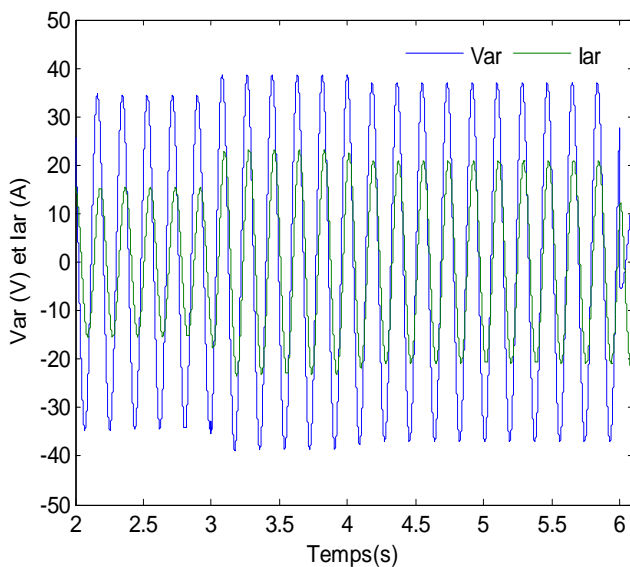
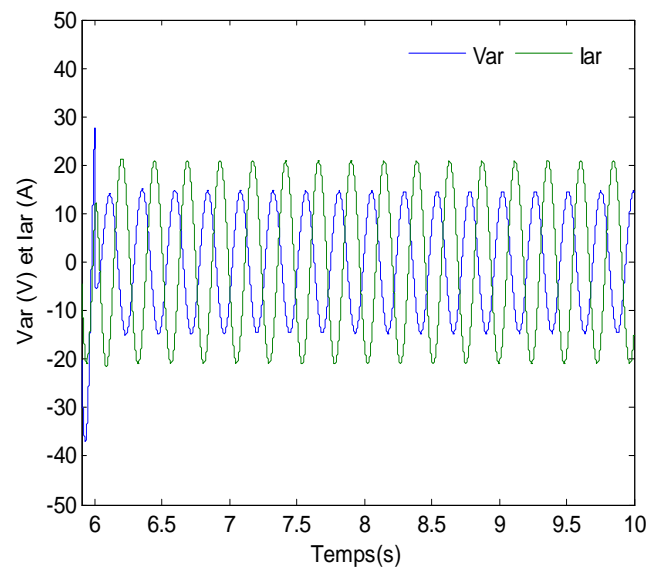


Fig.IV.6 : Variation de glissement

Figure IV.7 : Zoom sur la tension et le courant rotorique en hypo synchrone ($g > 0$)Figure IV.8 : Zoom sur la tension et le courant rotorique en hyper synchrone ($g < 0$)

1.2.1. Interprétation des résultats :

Les figures (IV.4) et (IV.5) montrent les résultats obtenus pour le test de régulation en puissance de la MADA. Les puissances active et réactive statoriques étant fixées à -7.5kW et 2kVAR respectivement, à l'instant $t=6\text{s}$ la vitesse rotorique varie brusquement de 1337 à 1548tr/min (qui correspond à une variation du glissement de -3.3% jusqu'à $+10\%$). A l'instant du changement de la vitesse, le régulateur PI se montre robuste et rejette la perturbation. L'écart en régime permanent entre les puissances (active et réactive) statoriques simulées et ses références (Voir les figures IV.1, IV.2, IV.4, IV.5), est dû à la synthèse des régulateurs, où nous n'avons pas pris en compte la résistance statorique.

Le glissement de la MADA est donné à la figure(IV.6). Les figures(IV.7) et (IV.8) montrent des zooms sur le courant et la tension d'une phase rotorique. Au régime hyper-synchrone ($g < 0$), le courant et la tension rotorique sont en opposition de phase, car dans ce mode de fonctionnement, le rotor fournit de la puissance active au réseau. Au régime hypo-synchrone ($g > 0$), le courant et la tension sont en phase. Cependant nous remarquons un petit déphasage entre ces deux grandeurs qui est du à la puissance réactive circulant entre le rotor et le réseau. Dans ce mode de fonctionnement le rotor absorbe de la puissance active à partir du réseau.

1.3. Test de robustesse

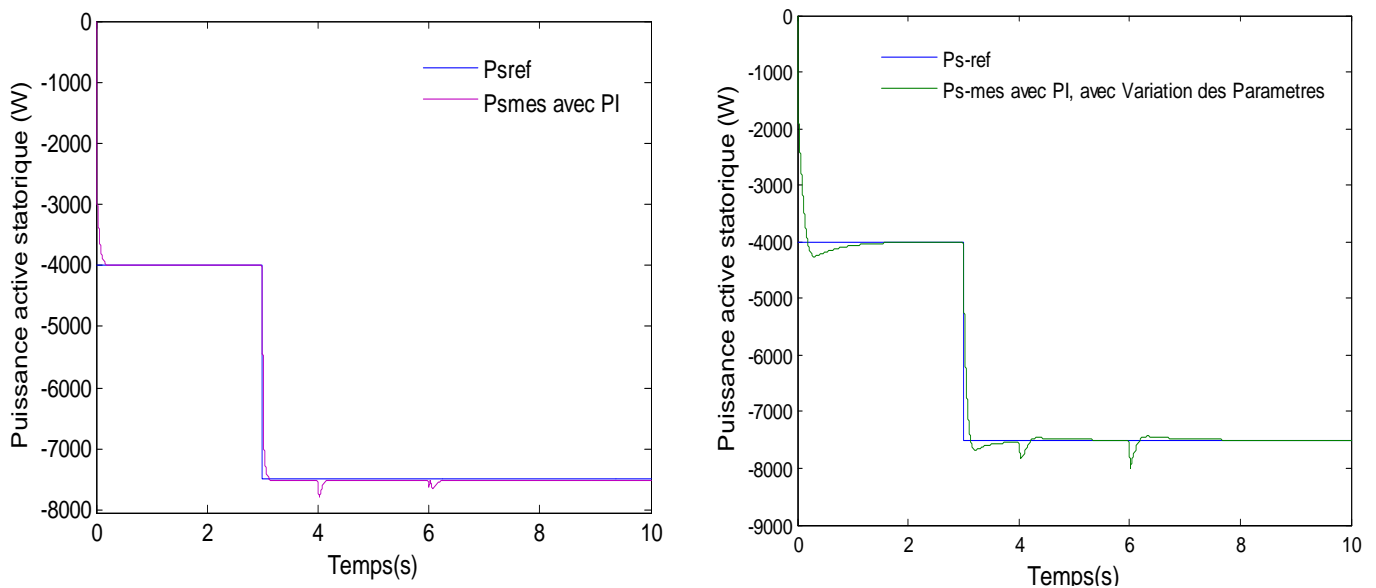
Plusieurs phénomènes physiques provoquent des variations des paramètres du modèle de la machine asynchrone. Entre autres, une élévation de température augmente les valeurs des résistances. Pour faire cet essai on fait varier les paramètres du modèle de la MADA utilisée car les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert de paramètres fixes. Mais en réalité ces paramètres sont variables à cause de différents phénomènes physiques.

- **Condition de simulation**

Cet essai consiste à appliquer aux entrées de commande les mêmes échelons de puissance active et réactive ainsi que la variation de vitesse appliqués dans les tests précédents et on pose les nouvelles valeurs des paramètres :

$$R_r' = 2 * R_r, R_s' = 1.3 * R_s, L_s' = L_s / 2, L_r' = L_r / 2, M_{rs} = M_{rs} / 2.$$

Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes :



a. Avant la variation des paramètres

a. Après la variation des paramètres

Figure IV.9 : Test de robustesse pour la puissance active statorique avec le régulateur PI.

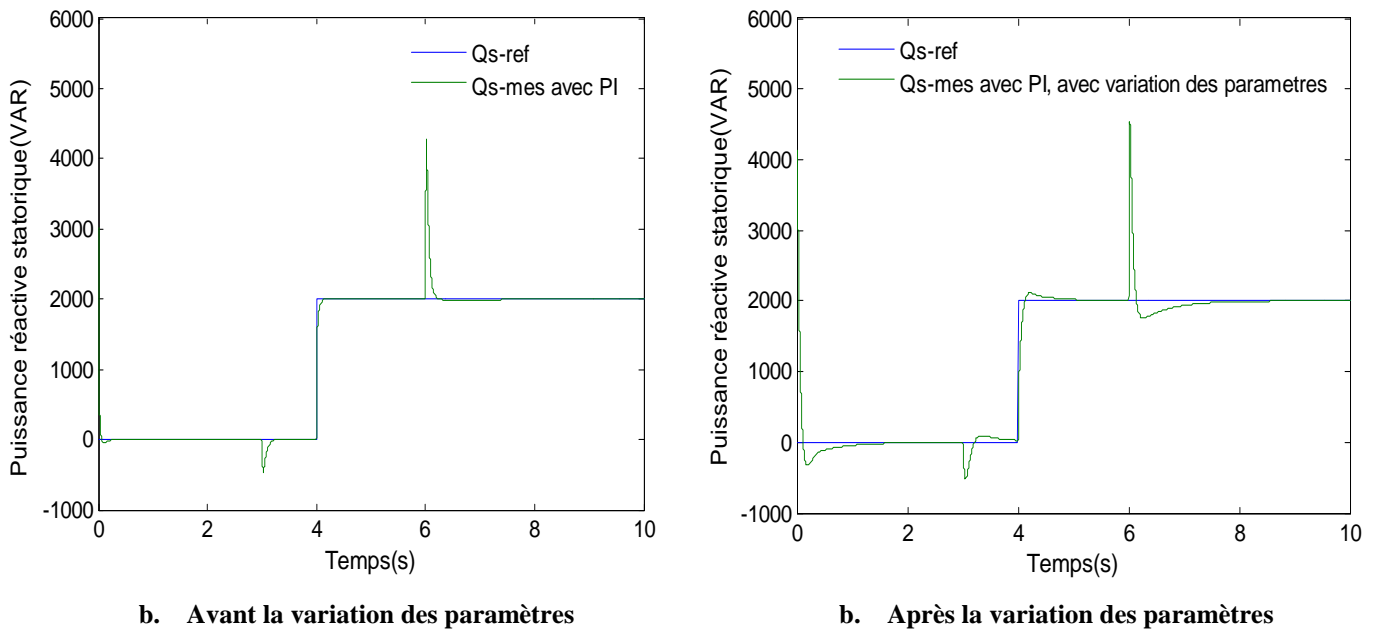


Figure IV.10 : Test de robustesse pour la puissance réactive statorique avec le régulateur PI

1.3.1. Interprétation des résultats :

D'après les figures obtenues (figure IV.10) pour la puissance active et pour la puissance réactive on peut constater que le régulateur PI n'est pas parfaitement robuste vis à vis l'influence des variations des paramètres de la machine qui augmente le temps de réponse de celui-ci et cela apparait dans la stabilisation des puissances qui prennent un certain temps pour qu'ils se stabilisent.

2. Résultats de simulation de la commande de la MADA ; comparaison entre les régulateurs PI et RST

Ce paragraphe va permettre de tester et de comparer les performances des deux régulateurs PI et RST en simulation, utilisés avec le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation présentée précédemment. Pour chaque série d'essais (suivi de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse), nous testerons la régulation des puissances actives et réactives.

2.1. Suivi de consigne

Les conditions de simulation dans cette étape sont les mêmes condition dans le cas précédent cas du régulateur PI

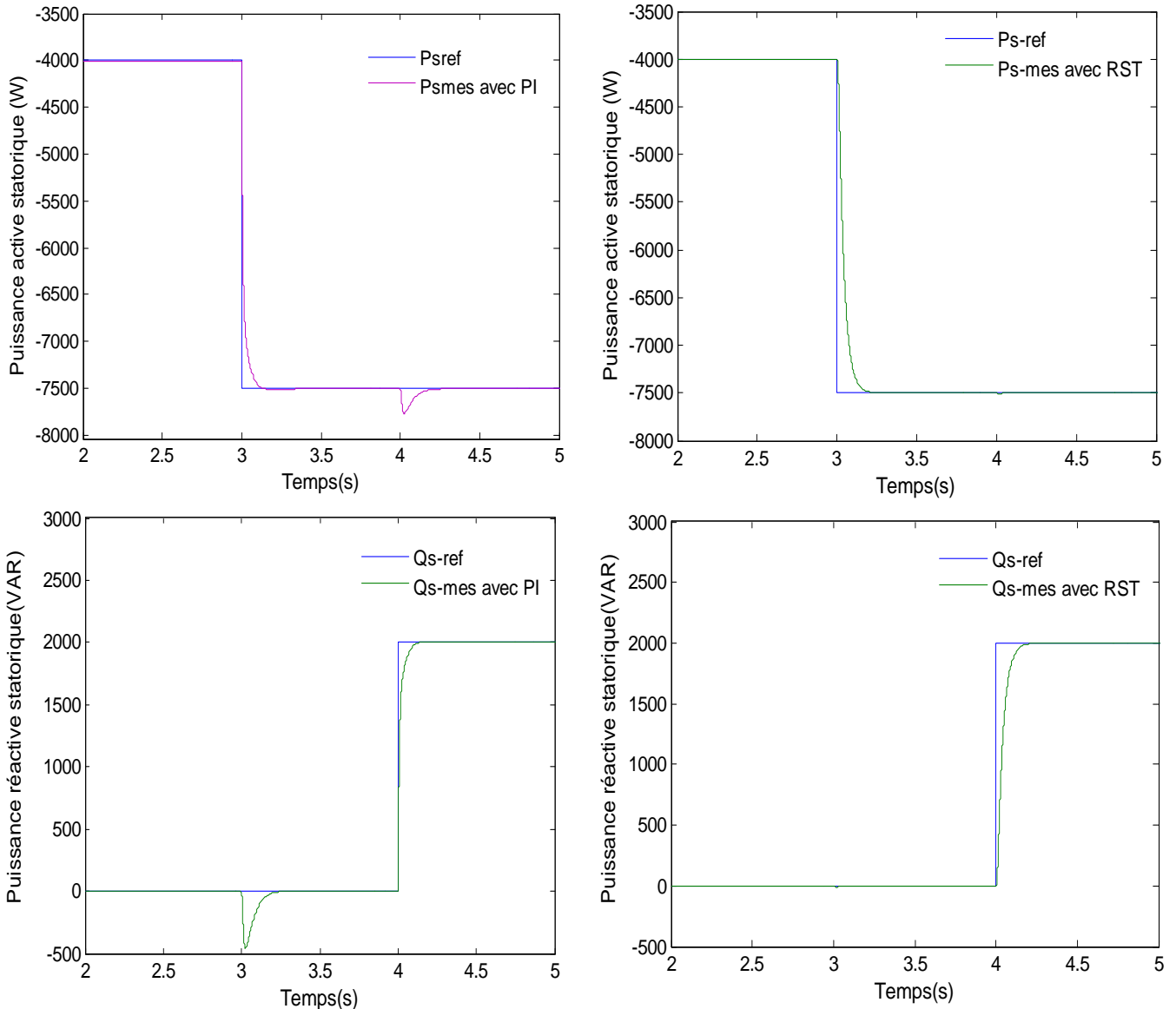


Figure IV.11 : Suivi de consigne de puissances active et réactive, comparaison entre la commande avec les régulateur PI et RST.

2.1.1 Interprétation des résultats

Pour la commande RST le comportement est simulé, avec les mêmes valeurs et les mêmes changements de référence que pour la commande par PI, d'après la figures (IV.11), on constate que les réponses obtenues sont améliorées par rapport aux celles obtenues par PI, les puissances active et réactive suivent bien leur référence avec un dépassement moins important par rapport au régulateur PI. On remarque aussi que le découplage entre les deux puissances est affecté.

2.2. Sensibilité aux perturbations

On sauvegarde les mêmes conditions de la simulation comme dans le cas du régulateur PI

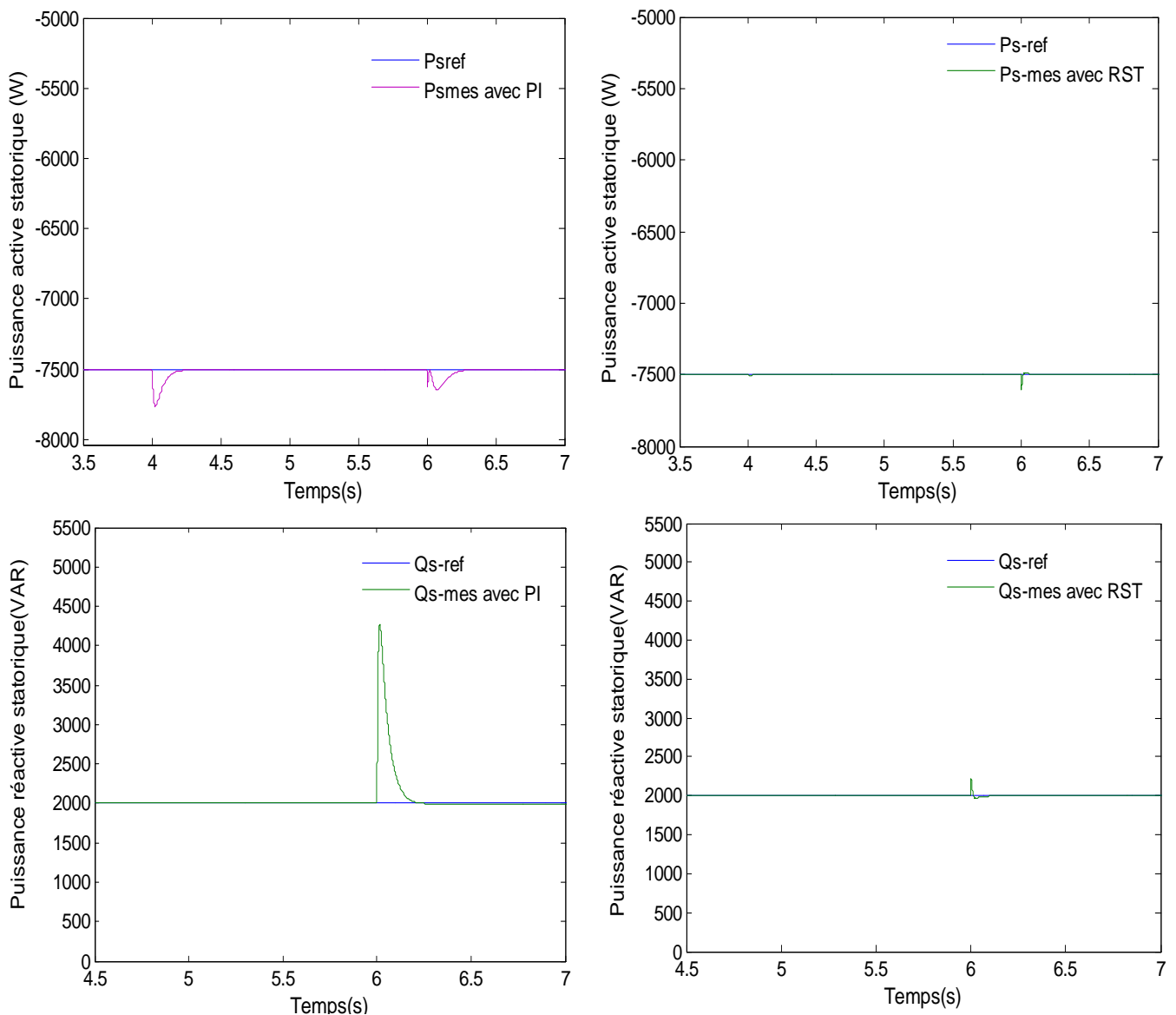


Figure IV.12 : Effet de variation brusque de la vitesse sur P_s et Q_s , comparaison entre la commande avec les régulateur PI et RST.

2.2.1 Interprétation des résultats

L'effet de cette variation de vitesse sur les puissances active et réactive de la machine est montré sur la figure (IV.12) pour le régulateur PI et pour le régulateur RST. Les mesures de puissances montrent un écart important par rapport à la valeur de la référence pour le régulateur PI, par contre pour Le régulateur RST, on constate l'apparition éventuelle de la perturbations mais il rejette par conséquent plus efficacement les effets de la variation de vitesse.

2.3. Robustesse

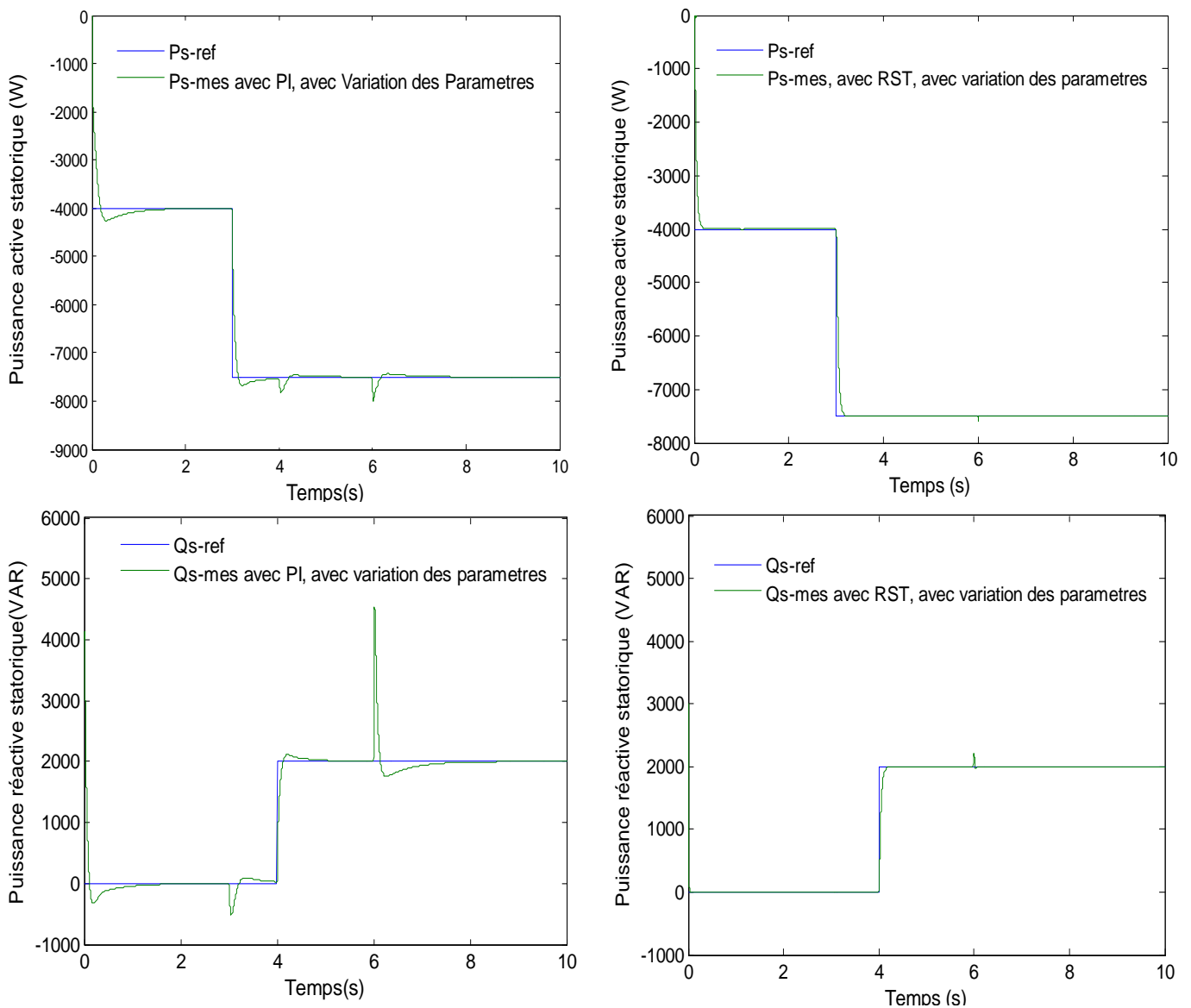


Figure IV.13 : effet de variation des paramètres de la MADA sur P_s et Q_s , comparaison entre la commande avec les régulateur PI et RST.

2.3.1 Interprétation des résultats

D'après la figure (IV.13), pour la puissance active et pour la puissance réactive on peut constater que l'influence des variations des paramètres est plus importante sur le régulateur PI que sur le régulateur RST et cela apparait dans la stabilisation des puissances qui se fait rapidement dans la commande avec le régulateur RST que celle avec le régulateur PI ou les puissances prennent un certain temps pour qu'ils se stabilisent.

3. Résultats de simulation de la commande de la MADA associée à une turbine éolienne (MPPT) avec les régulateurs PI et RST

Cette phase consiste à montrer les résultats des simulations de la commande indirecte réalisée, pour l'ensemble MADA + turbine par l'usage des deux régulateurs PI et RST, en appliquant la stratégie de commande MPPT. L'essai de simulation a été effectué en utilisant un profil du vent proche de la réalité illustré dans la figure(IV.14), la valeur de la référence pour la puissance active est calculée par la MPPT et la valeur de la puissance réactive est maintenue nulle afin de garantir un facteur de puissance unitaire.

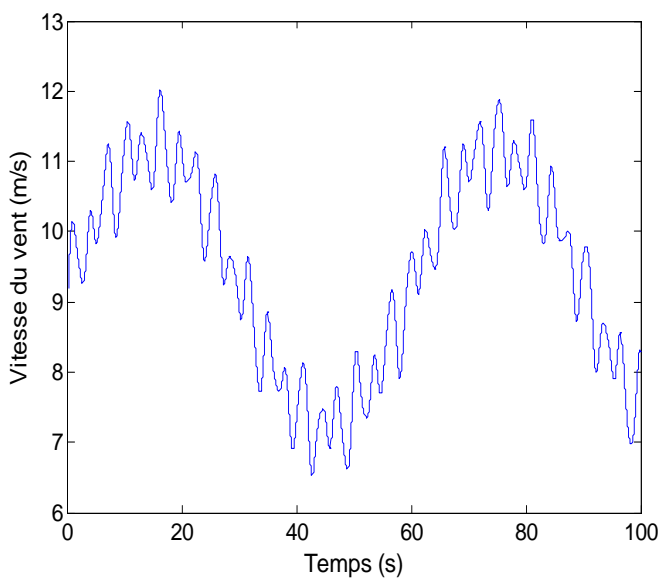


Figure IV.14 : Profil du vent appliqué

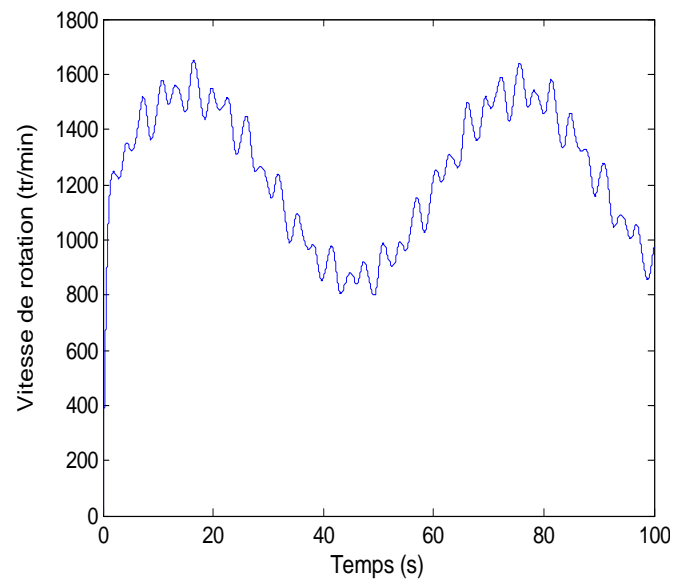


Figure IV.15 : Vitesse de la machine

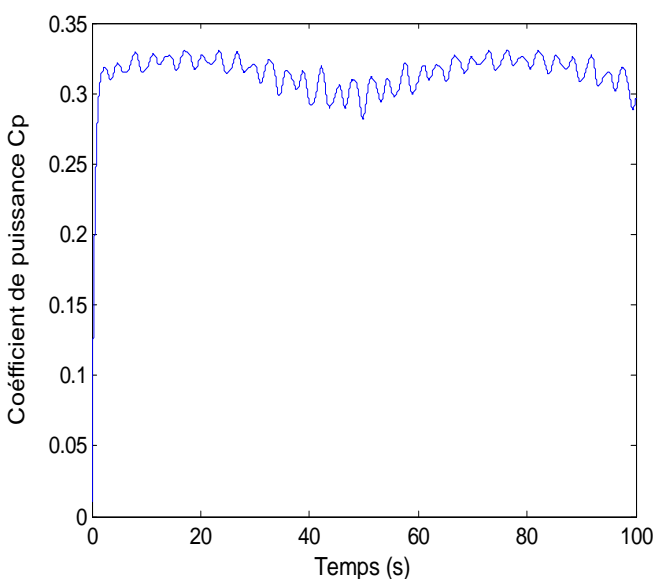


Figure IV.16 : Coefficient de puissance Cp.

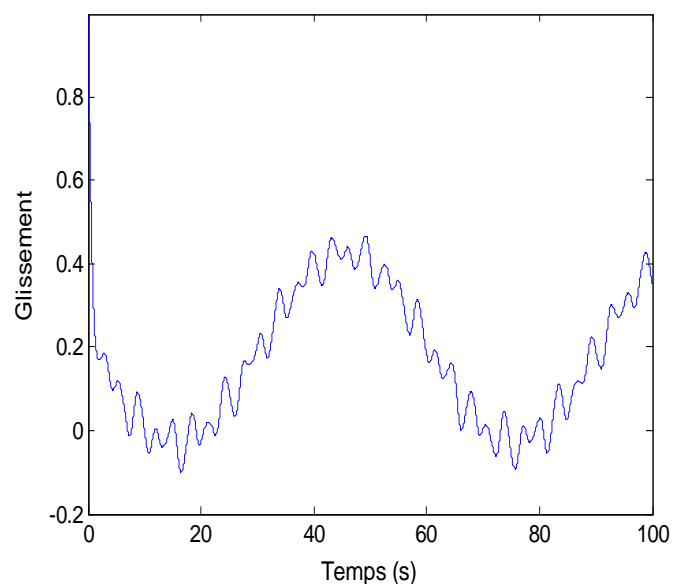


Figure IV.17 : Allure du glissement.

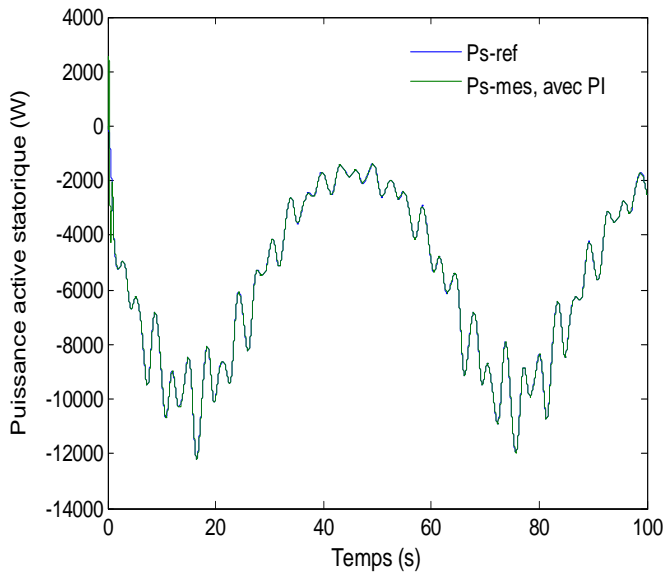


Figure IV.18 : Suivi de consigne pour la puissance active statorique.

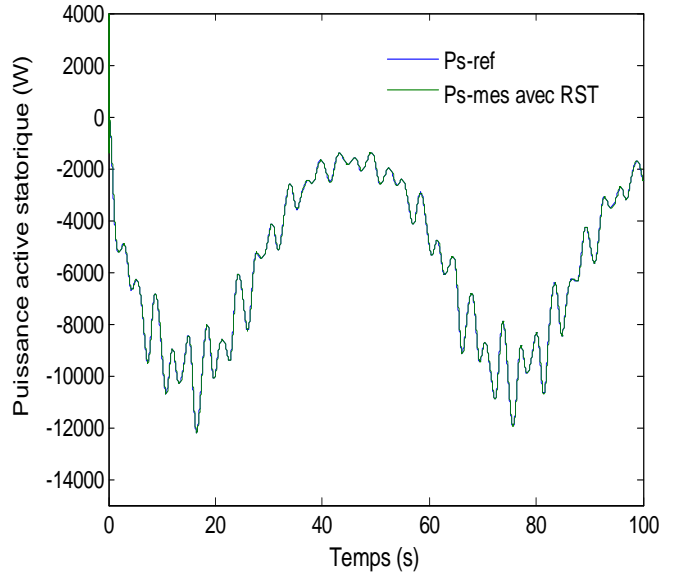


Figure IV.19 : Suivi de consigne pour la puissance active statorique.

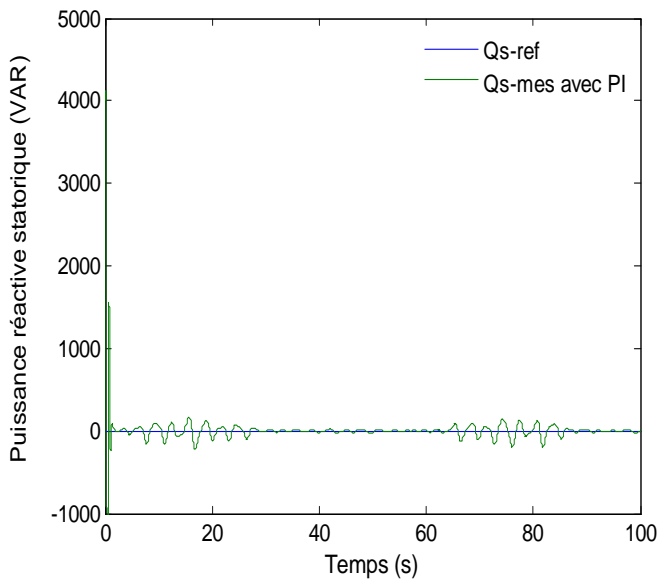


Figure IV.20: Suivi de consigne pour la puissance réactive statorique.

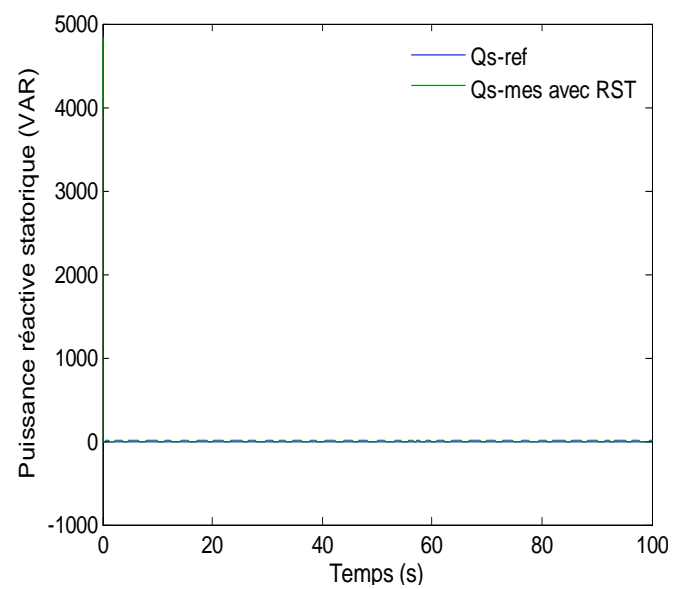


Figure IV.21 : Suivi de consigne pour la puissance réactive statorique.

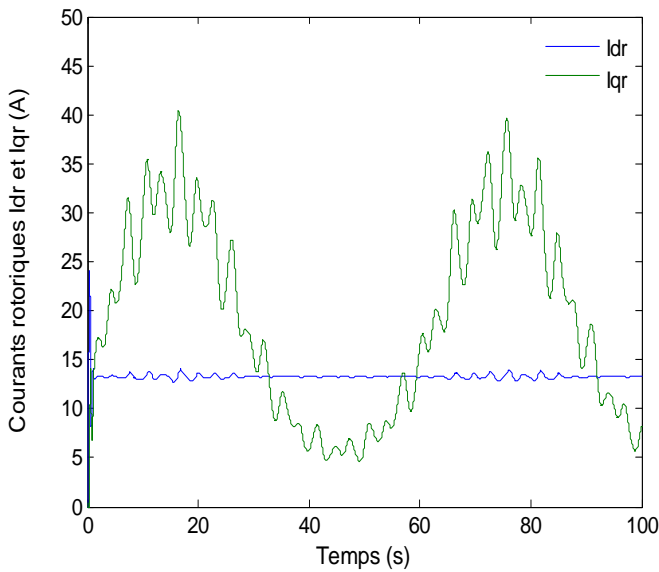


Figure IV.22 : Courants rotoriques direct et quadrature de la MADA par le régulateur PI.

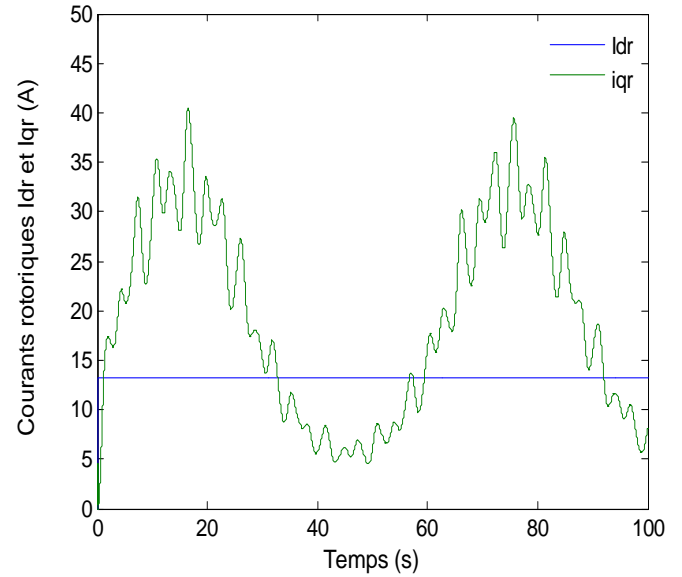


Figure IV.23 : Courants rotoriques direct et quadrature de la MADA par le régulateur RST.

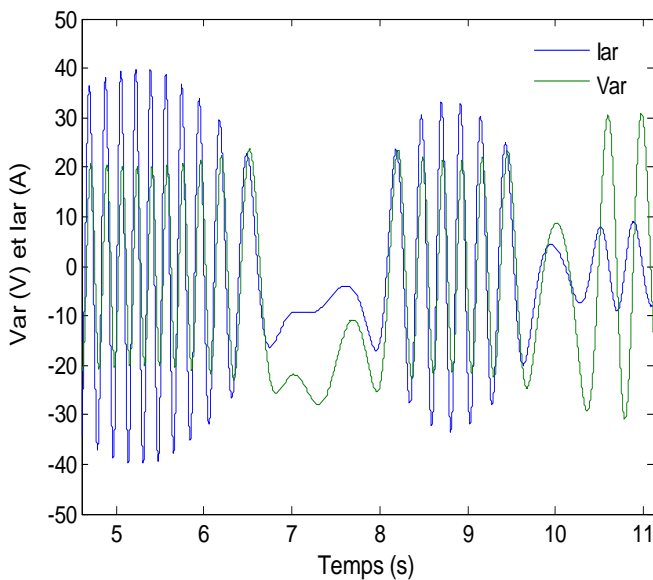


Figure IV.24 : Zoom sur la tension et le courant rotorique en hypo synchrone ($g > 0$)

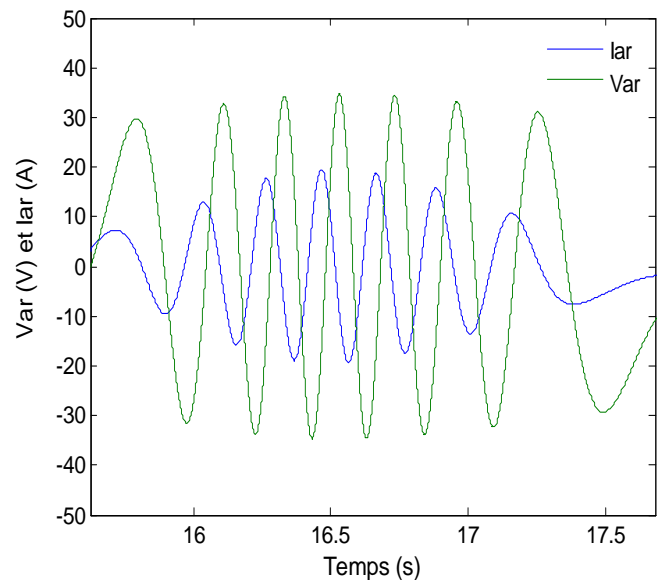


Figure IV.25 : Zoom sur la tension et le courant rotorique en hyper synchrone ($g < 0$)

3.1. Interprétation des résultats

La figure (IV.15) montre la vitesse de la génératrice pour le profil du vent appliqué, elle illustre le fonctionnement en hyper synchrone et hypo synchrone. Pour l'intervalle allant de $t=10s$ à $t=20s$ se voit nettement que la vitesse dépasse la vitesse du synchronisme 1500 tr/mn donc on est dans le fonctionnement hyper synchrone et ce, pour une amplitude de vent partant de la valeur 12 m/s . l'hypo synchronisme est donné dans l'intervalle de temps allant de $t=30s$ à $t=46s$.

La figure(IV.17) illustre l'allure du glissement de la machine, et là également, on voit nettement le fonctionnement de la machine en hyper synchrone représenté par un glissement négatif, le fonctionnement synchrone par un glissement nul et le fonctionnement hypo synchrone par un glissement positif. Les intervalles temporels correspondent exactement à ceux décrit précédemment pour l'allure de la vitesse de la génératrice.

Les figures (IV.18, IV.19, IV.20 et IV.21) donnent les deux puissances actives et réactives statoriques avec leurs références respectives. Nous remarquons une parfaite poursuite de référence accompagnée de faibles oscillations autour de la consigne en régime permanent lors de la commande RST par rapport à celle du PI, ce qui explique la robustesse des régulateurs RST en faisant face à toutes les variations brusques du vent.

Les figures (IV.24) et (IV.25) représentent un zoom sur la tension et le courant d'une phase rotorique. Au régime hyper synchrone ($g < 0$), le courant et la tension rotorique sont en opposition de phase, car dans ce mode de fonctionnement, le rotor fournit de la puissance active au réseau. au régime hypo synchrone ($g > 0$), le courant et la tension sont en phase . Cependant nous remarquons un petit déphasage entre ces deux grandeurs qui est du à la puissance réactive circulant entre le rotor et le réseau.

4. Conclusion

Pour les résultats obtenus sur la commande de la MADA, les différences entre les deux régulateurs sont peu significatives en ce qui concerne le suivi de consigne et la robustesse bien que le régulateur RST se montre plus performant en limitant l'amplitude des oscillations transitoires (dépassement réduit et temps de réponse rapide). Face aux perturbations, le régulateur PI, qui ne les prend pas en compte dans sa synthèse se montre moins performant que le RST.

A decorative graphic of a scroll, oriented horizontally. The scroll is white with a thin black border. It has a vertical strip on the left side, suggesting a binding or spine. The top and bottom edges are rounded. At the top-left and top-right corners, there are small, grey, semi-circular elements that look like the ends of the scroll's folds or the binding mechanism.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a essentiellement porté sur l'étude de la commande en puissance d'une machines asynchrones à double alimentation utilisée dans les systèmes éoliens.

Ce travail a été focalisé sur l'étude, la commande puis la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une machine asynchrone à double alimentation dont on a commandé ces puissances active et réactive grâce à ces grandeurs rotoriques.

Le premier chapitre a traité un état de l'art sur les systèmes éoliens avec une présentation du principe fondamental de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Puis une comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable a été effectué ainsi que les différentes associations machine convertisseur de puissance ont été présenté, ce qui nous a permis de se fixer sur l'étude d'un système basé sur une machine asynchrone à double alimentation MADA.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur la MADA en donnant sa description, et ces différents modes de fonctionnement. La deuxième partie de ce chapitre a été consacré pour la modélisation de la MADA, en donnant les équations électrique, magnétique et mécanique régissant la machine asynchrone à double alimentation.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande en puissance d'un système de conversion de l'énergie éolienne basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation. Le modèle utilisé est celui de Park, exprimé dans référentiel tournant à la vitesse de synchronisme et dont l'axe direct est aligné avec le flux statorique. Une fois cette orientation réalisée, les expressions des puissances active et réactive fournies par le stator sont facilement exprimées en fonction des tensions rotoriques. Ceci a démontré la possibilité d'autopilotage et de commande en puissance de la génératrice asynchrone par son rotor. Dans ce chapitre, la commande vectorielle est basée sur deux régulateurs de philosophies différentes (proportionnel intégral et régulateur RST).

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la simulation du système sous le logiciel Matlab-Simulink à travers plusieurs essais afin de tester les performances des régulateurs qui sont la poursuite de trajectoire, le rejet de perturbations et enfin la robustesse.

Comme suite à notre travail, nous pouvons citer une liste de quelques travaux que nous avons jugés intéressants de réaliser dans un avenir proche :

- Etudier et synthétiser la commande de la MADA en utilisant le régulateur LQG (Linéaire Quadratique Gaussien) et faire la comparaison avec les deux régulateurs étudiés.
- Synthétiser une commande mixte PI-RST afin de minimiser le coût.
- La réalisation d'une plateforme expérimentale permettant d'expérimenter en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur un réseau alternatif et par la même valider les résultats de simulation présentés dans ce mémoire.



Références

-
- [1] F. Poitiers, *“Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne”*, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [2] O. Gergaud, *“Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur”*, Thèse de doctorat de l'école supérieure de CACHAN, Décembre 2002.
- [3] J. F. Manwell, J. G. Mc Gowan, A. L. Rogers, *“Wind energy explained: theory, design and application”*, John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2002.
- [4] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, *“The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology”*, NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [5] H. Camblong, *“Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable”* Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'Arts et métiers centre de Bordeaux, décembre2003.
- [6] A. Davigny, *“Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie”*, thèse de doctorat, Université de Lille2007.
- [7] M. Si Brahim, *“Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone”*, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Juin 2015.
- [8] S. S. Murphy, O.P. Malik and A. K. Tandon, *“Analysis of self-excited induction generators”*, IEE Generation, Transmission and Distribution, Volume 129, Part C, Number 6, November 1982, pp 260-265.
- [9] A. Tounzi, *“Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité”*, Revue IEEE, Mars 2000, pp. 24-38.
- [10] B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, *“Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension”*, Revue REE, N°5, pp65-74, Mars 2005.
- [11] D. Schreiber, *“State of art of variable speed wind turbines”*, 11th Internationalsymposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROMproceedings.

- [12] S. Heier, *"Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems"*, Publications JohnWiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [13] A. Boyette, *"Control commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne"*, Thèse de doctorat, de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, France, Décembre 2006.
- [14] Y. HOCINI, *"Commande D'une Génératrice Pour Energie Eolienne "*, mémoire de Magistère, Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, Mais 2013.
- [15] L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack *"Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator"*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [16] N. Akkari, *"contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation"*, Thèse de doctorat, Université de Batna, Juin 2010.
- [17] N. Abu Tabak. *"Stabilité dynamique des systèmes électriques multi-machines : Modélisation, commande, observation et simulation"*, Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Lyon, 2008.
- [18] M. Dahmani, H. Yakoubi, *"Commande d'un système de production de l'énergie éolienne"*, Mémoire de Mastère académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Juillet 2016.
- [19] B. Kelkoul, *" Etude et Commande d'une Turbine Eolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation"*, Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [20] S. Bellarbi, *"Comportement électrique et mécanique d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau électrique"*, Publication, 16emes Journées Internationale de Thermique, Marrakech, Maroc, Du 13 au 15 Novembre 2013.
- [21] C. Saget, *"La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne"*, REE, n° 7, Juillet 1998, pp. 42-48.

- [22] M. Rapin, J. M. Noel, *"Energie éolienne, principe et étude de cas"*, Edition Dunod, 2010.
- [23] A. Gaillard. *"Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service"*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I. Avril 2010.
- [24] N. HAMDI, Mémoire de magister *"Modélisation et commande des génératrices éoliennes "*, Université Mentouri de Constantine, Janvier 2008.
- [25] I. HAMZAOU, *"Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur"*, Mémoire Magister, ENP Alger, Janvier 2008.
- [26] S. A. E. ARDJOUN, *"Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation"*, Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2010.
- [27] B. Robyns, M. Esselin, *"Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator"*, Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.
- [28] M. MACHMOUM, *"contribution à l'étude et la commande numérique de l'ensemble cyclo-convertisseur triphasé-machine asynchrone à double alimentation"*, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de LORRAINE, NANCY, 1989.
- [29] M.Y TACHAFINE, *"contribution à la modélisation et à l'étude des machines triphasées associées à des convertisseurs statiques"*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de LORRAINE, NANCY, 1986.
- [30] B. Cherif, *"simulation de la commande vectorielle"*, Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider. Biskra. Octobre 2012.
- [31] F. A. TRIA, *"Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA par différentes techniques"* mémoire de magister, Université d'El-oued. 2012 /2013.
- [32] P. DE LARMINAT, *"Automatique, commande des systèmes linéaires"*, Editions Hermes, 1996.
- [33] A. JUTARD M. BETEMPS, *"Le régulateur RST"*, Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon, cours Automatique sur le net, "Chapitre 9". 1998.
- [34] Y. MOKHTARI, *"Etude de la Machine Asynchrone Double Alimentée (MADA) dédiée à l'Eolien"*, Mémoire de Magister, Université A. MIRA de Bejaïa, Décembre 2009.

- [35] F. GOUAISBAUT, "*La commande RST*", Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Centre national de la recherche scientifique, Université Paul Sabatier, Octobre 2007.
- [36] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, and R.A. Lakin, "Stator- flux-oriented control of a doubly fed induction machine with and without position encoder," IEE Proc. - Electric Power Application. vol.147, no.4, 2000, pp.241- 251.
- [37] N. Akkari, A. Chaghi and R. Abdessemed "*Study and Simulation of RST Regulator Applied to a Double Fed Induction Machine (DFIM)*" Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 308~313, 2008.
- [38] F. POITIERS, M. MACHMOUM, R. Le DOEUFF, M.E. ZAIM, "*Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems*", International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 3, N° 3, pp. 373-378, December 2001.
- [39] BOUTABBA TAREK, "*Commande vectorielle en temps discret d'une Machine à Induction*", mémoire magistère, Université de Batna 2008.
- [40] Y.MOKHTARI H.BEKKA D.REKIOUA, "*Comparison of PI and RST controllers dedicated to wind energy*", 3rd International Conference in Electrical Engineering Design and Technologies, Sousse-Tunisia, Oct.31-Nov.02. 2009.
- [41] Y.MOKHTARI, H.BEKKA, D.REKIOUA, S.BACHA, "*Active and Reactive Power Control for a Doubly Fed Induction Machine in Wind Energy Conversion System* ", 2nd Workshop International sur les Energies Renouvelables et leurs Applications, University A. Mira de Béjaia, Algérie, 17-18 Nov. 2009.



Annexes

Annexe A

Déduire les équations des courants statorique et rotorique direct et en quadrature

Les équations des courants statorique et rotorique sur les deux axes d et q sont données par les équations ci-dessous :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{dr} \quad (1)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{qr} \quad (2)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{ds} \quad (3)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{qs} \quad (4)$$

A partir de l'équation (1) et (3), on obtient :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_s} \left(\frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{ds} \right)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_s L_r} \varphi_{dr} + \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} i_{ds}$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{dr} \quad (5)$$

Où σ est le coefficient de dispersion $\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$

A partir des équations (2) et (4), on obtient :

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_s} \left(\frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_r} i_{qs} \right)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_s L_r} \varphi_{qr} + \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} i_{qs}$$

$$i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qr} \quad (6)$$

En substituant (1) dans (3), on obtient :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{1}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{dr} \right)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{L_s L_r} \varphi_{ds} + \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} i_{dr}$$

$$i_{dr} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{ds} \quad (7)$$

En substituant (2) dans (4), on obtient :

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{1}{L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{qr} \right)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{L_s L_r} \varphi_{qs} + \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} i_{qr}$$

$$i_{qr} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qs} \quad (8)$$

Finalement on retient les équations (5), (6), (7) et (8) pour former le système (9) :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qr} \\ i_{dr} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qs} \end{cases} \quad (9)$$

Pour déterminer le modèle global, nous considérons le développement suivant selon les étapes qui vient :

En dérivant les termes de l'équation (5) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{ds} = V_{ds} - R_s i_{ds} + \varphi_{qs} \omega_s \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = V_{dr} - R_r i_{dr} + \varphi_{qr} \omega_r \end{cases} \quad (11)$$

En remplaçant (11) dans (10) on obtient :

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (V_{ds} - R_s i_{ds} + \varphi_{qs} \omega_s) - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (V_{dr} - R_r i_{dr} + \varphi_{qr} \omega_r)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{R_s}{\sigma L_s} i_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{qs} \omega_s - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} R_r i_{dr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qr} \omega_r$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s} (L_s i_{qs} + M_{sr} i_{qr}) \omega_s - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{dr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{dr}$$

$$+ \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \omega_r$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{dr} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma L_s} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{dr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} i_{qr} \omega_r \quad (12)$$

En dérivant les termes de l'équation (6) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{qs} = V_{qs} - R_s i_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = V_{qr} - R_r i_{qr} + \varphi_{dr} \omega_r \end{cases} \quad (14)$$

En remplaçant (14) dans (13) on obtient :

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (V_{qs} - R_s i_{qs} + \varphi_{ds} \omega_s) - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (V_{qr} - R_r i_{qr} + \varphi_{dr} \omega_r)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} - \frac{R_s}{\sigma L_s} i_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{ds} \omega_s - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} R_r i_{qr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{dr} \omega_r$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} (L_s i_{ds} + M_{sr} i_{dr}) \omega_s - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{qr} \\ &\quad + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (L_r i_{dr} + M_{sr} i_{ds}) \omega_r \end{aligned}$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qr} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma L_s} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{ds} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} i_{qr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} i_{dr} \omega_r \quad (15)$$

En dérivant les termes de l'équation (7) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{ds} = V_{ds} - R_s i_{ds} + \varphi_{qs} \omega_s \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = V_{dr} - R_r i_{dr} + \varphi_{qr} \omega_r \end{cases} \quad (17)$$

En remplaçant (17) dans (16) on obtient :

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{dr} - R_r i_{dr} + \varphi_{qr} \omega_r) - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (V_{ds} - R_s i_{ds} + \varphi_{qs} \omega_s)$$

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{dr} + \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{qr} \omega_r - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{ds} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} R_s i_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{qs} \omega_s$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + \frac{1}{\sigma L_r} (L_r i_{qr} + M_{sr} i_{qs}) \omega_r - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{ds} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{ds} \\ &\quad - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (L_s i_{qs} + M_{sr} i_{qr}) \omega_s \\ \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{ds} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + \left(\frac{1}{\sigma L_r} \omega_r - \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_s \right) i_{qr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{ds} \\ &\quad - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} i_{qs} (\omega_r + \omega_s) \quad (18) \end{aligned}$$

En dérivant les termes de l'équation (8) par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{qs} = V_{qs} - R_s i_{qs} - \varphi_{ds} \omega_s \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = V_{qr} - R_r i_{qr} - \varphi_{dr} \omega_r \end{cases} \quad (20)$$

En remplaçant (20) dans (19) on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} (V_{qr} - R_r i_{qr} - \varphi_{dr} \omega_r) - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (V_{qs} - R_s i_{qs} - \varphi_{ds} \omega_s) \\ \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{qr} - \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{dr} \omega_r - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} R_s i_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \varphi_{ds} \omega_s \\ \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{qr} - \frac{1}{\sigma L_r} (L_r i_{dr} + M_{sr} i_{ds}) \omega_r - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{qs} \\ &\quad + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} (L_s i_{ds} + M_{sr} i_{dr}) \omega_s \\ \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_{qs} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{qr} + \left(-\frac{1}{\sigma L_r} \omega_s + \frac{M_{sr}^2}{\sigma L_s L_r} \omega_r \right) i_{dr} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_s} i_{qs} \\ &\quad + \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} i_{ds} (\omega_r - \omega_s) \quad (21) \end{aligned}$$

Annexe B

Paramètres de la machines asynchrone à double alimentation

• Puissance nominale	$10kW$
• Tension nominale	$V_s=380V$
• Résistance du stator	$R_s=0.455\Omega$
• Résistance du rotor	$R_r=0.62\Omega$
• Inductance propre du stator	$L_s=0.084H$
• Inductance propre du rotor	$L_r=0.081H$
• Inductance mutuelle	$M_{sr}=0.078H$
• Nombre de paires de pôles	$p=2$
• Fréquence statorique	$f=50Hz$
• Constante de temps statorique	$T_s=L_s/R_s$
• Constante de temps rotorique	$T_r=L_r/R_r$
• Coefficient de dispersion	$\sigma=1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$

Paramètres de la turbine

- Rayon de la turbine : $R=5m$
- Coefficient d'inertie de la turbine : $J_t=1.4*10e6$
- Coefficient dû au frottement visqueux de la turbine $f_i=0.005 N.m.s/rd$
- Gain du multiplicateur de vitesse : $G=90$.
- Inertie de l'arbre : $J=114 kg/m^2$
- La densité de l'air : $\rho =1.225 kg/ m^3$
- L'angle de calage des pales en degrés : $\beta=2$
- Le ratio de vitesse : $\lambda_{opt}= 7,07$
- Coefficient de puissance maximal $C_p = C_{pmax}= 0.35$

Paramètres des régulateurs

- | | |
|---|---------------|
| • Temps de réponse du régulateur de courant | $trq=0.001 s$ |
| • Temps de réponse du régulateur de puissance | $trc=0.005 s$ |

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire a essentiellement porté sur l'étude de la commande en puissance d'une machines asynchrones à double alimentation utilisée dans les systèmes éoliens.

La première partie est consacrée à dresser un état de l'art sur les systèmes éoliens. La deuxième partie présente une étude et la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. La troisième partie de ce mémoire met en œuvre la commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques, élaborée et testée en synthétisant deux types de régulateurs : Proportionnel- Intégral et RST basé sur la théorie du placement de pôles. Les performances du dispositif sont analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations dans la quatrième partie.

Mots Clefs :

Eolienne, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, régulateur PI, régulateur RST