

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

Ecole Nationale Polytechnique  
*Département du Génie Electrique*



*Projet de Fin d'Etudes*  
*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat*  
*En Electrotechnique*

*Thème*

**MODÉLISATION ET COMMANDE D'UNE MACHINE**  
**ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION POUR LA**  
**PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

*Proposé et dirigé par :*

**Pr. MO. MAHMOUDI.**

*Présenté et étudié par :*

**Yacine Abderrahmane BENCHERIF.**

*Promotion Juin 2008*

*E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger.*

## REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à monsieur **M.O MAHMOUDI**, professeur à l'ENP, pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et de me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.*

*À mes très chères sœurs et à ma grande famille.*

*À tous mes amis.*

*À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*À vous.*

*Yacine.*

## ملخص

يقدم هذا العمل دراسة طرق التحكم في المولد الحثي ثنائي التغذية المستعمل في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء. من أجل ذلك قمنا بإنشاء نموذج لكل مكونات المولد الهوائي : التوربين، المولد الحثي ثنائي التغذية، و السلسلة المتكونة من المموج و المقوم. بهدف توليد أكبر قدر ممكن من الطاقة، قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي، و التي تسمح بدورها في التحكم في الطاقة التفاعلية و الردية. لتحقيق هذا التحكم، استخدمنا عدة أنواع من المنظمات، كما حللنا و قارنا أدوات هذه المنظمات المستعملة في النظام المذكور سالفًا. تغذية العضو الدوار كانت عن طريق المموج المتحكم فيه بتقنية تعديل طول النبضة. أما بالنسبة للمقوم الذي يقوم بتغذية المموج، فاستعملنا تقنية التحكم بواسطة التيار، وذلك للحفاظ على جودة الشبكة. اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة المولد الهوائي، و استخلصنا من ذلك أن الماكينة اللاتزامنية ثنائية التغذية لها قدرة جيدة على العمل في التطبيق السالف الذكر.

### الكلمات المفتاحية:

الماكينة اللاتزامنية ثنائية التغذية، مولد الهوائي، ترميم، مموج، مقوم، تحكم شعاعي.

## Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne.

Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, MADA et cascade redresseur-onduleur).

Afin d'atteindre le point de fonctionnement à puissance produite maximale (MPPT), une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse de trois régulateurs linéaires : PI, IP, RST.

Les performances du dispositif ont été analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations.

La MADA étant pilotée par le rotor nous avons appliqué la technique de commande par MLI triangulosinusoidale à l'onduleur. Pour éviter la dégradation du réseau nous avons commandé le redresseur en courant par la technique MLI à hystérésis.

Cette étude a été conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous avons pu ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

### Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, modélisation, onduleur, redresseur, commande vectorielle.

## Abstract

This work presents the modelling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production.

With this intention, a model of the different components of the wind generator (Turbine, DFIM and cascaded converter- inverter) was established.

The maximum power point tracking control was done by a vector control of the generator with active and reactive stator powers as control variables.

This control is elaborated by synthesizing three different linear controllers; PI, IP and RST.

The performances of the system are analysed and compared in terms of references tracking, robustness and disturbance rejection.

The converter is used for drive the DFIM. For this reason we used the PWM technique to control this device. In order to limit the damage of the network we controlled by the current the inverter by using the PWM hysteresis technique.

This study was concluded by a simulation of the wind generator. We observed at a result, that the DFIM is able to be used in the wind generation application.

### Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, inverter, converter, vector control.

# SOMMAIRE

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iv
Sommaire.....	v
Notations et symboles.....	viii
<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
Chapitre 1 : Analyse du fonctionnement de la MADA pour la production de l'énergie éolienne	
1. Introduction.....	04
2. Historique.....	05
3. Présentation du système éolien.....	05
3.1. Définition de l'énergie éolienne.....	05
3.2. Types d'aérogénérateurs.....	06
3.2.1. Aérogénérateur à axe verticale.....	06
3.2.2. Aérogénérateur à axe horizontale.....	07
3.3. Principales composantes des éoliennes à axe horizontale.....	07
4. Conversion de l'énergie éolienne.....	09
4.1 Lois de BETZ.....	09
4.2. Production de l'énergie mécanique.....	12
4.3. Utilité de la vitesse variable.....	12
4.4. Modes de régulation.....	13
4.4.1. Système à décrochage aérodynamique "stall".....	13
4.4.2. Système d'orientation des pales "Pitch".....	14
5. Conversion électromécanique.....	15
5.1. Systèmes de génération d'électricité.....	15
5.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	15
5.1.2. Système utilisant la machine synchrone.....	15
5.1.3. Systèmes utilisant des machines spéciales.....	15
5.2. Utilisation de la MADA dans la conversion électromécanique.....	16
5.2.1. Principe de fonctionnement.....	16
5.2.1.1. Moteur en hyposynchronisme.....	17
5.2.1.2. Moteur en hypersynchronisme.....	17
5.2.1.3. Génératrice en hyposynchronisme.....	17
5.2.1.2. Génératrice en hypersynchronisme.....	18
5.2.2. Différentes topologies de la MADA.....	18
5.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation type " <i>Brushless</i> ".....	18
5.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.....	19
5.2.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scheibius avec cycloconvertisseur.....	19
5.2.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scheibius avec convertisseur MLI Kramere.....	20
5.3. Application de la MADA dans le domaine éolien.....	21
6. Conclusion.....	22

## Chapitre 2 : Modélisation et stratégie de commande de la MADA

1. Introduction .....	23
2. Modélisation de la MADA .....	24
2.1. Hypothèses .....	24
2.2. Modèle mathématique de la MADA .....	24
2.2.1. Equations générales de la MADA .....	24
2.2.2. Modèle diphasé de la MADA .....	26
2.2.2.1. Equations des tensions.....	27
2.2.2.2. Equations des flux .....	27
2.2.2.3. Equations du couple électromagnétique .....	28
3. Stratégie de commande de la MADA.....	28
3.1. Commande vectorielle de la MADA.....	29
3.2. Relations entre les courants statoriques et rotoriques.....	30
3.3. Expressions des puissances actives et réactives dans le repère synchrone.....	30
3.4. Expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.....	31
3.5. Etablissement des angles nécessaires aux transformations .....	33
4. Calcul des tensions rotoriques de références pour la commande en puissances active et réactive de la MADA .....	34
4.1. Principe général.....	34
4.2. Commande directe.....	35
4.3. Commande indirecte.....	36
4.3.1. Commande indirecte sans boucle de puissance.....	37
4.3.2. Commande indirecte avec boucle de puissance .....	38
5. Conclusion .....	39

## Chapitre 3 : Synthèse des régulateurs et simulation

1. Introduction .....	40
2. Synthèse des régulateurs.....	41
2.1. Régulateurs PI .....	42
2.2. Régulateurs IP .....	44
2.3. Régulateurs RST.....	45
3. Analyse des performances:.....	48
3.1. Suivi de consignes .....	48
3.1.1. Conditions d'essais.....	48
3.1.2 Résultats et interprétation .....	49
3.2. Performances .....	54
3.2.1. Conditions d'essais.....	54
3.2.2 Résultats et interprétation .....	54
3.3. Robustesse .....	56
3.3.1. Conditions d'essais.....	57
3.3.1.1. Essai 1.....	58
3.3.1.2. Essai 2.....	58
3.3.1.3. Essai 2.....	58
3.3.2. Résultats et interprétation .....	58
4. Conclusion .....	62

## Chapitre 4: Modélisation et stratégie de commande de la cascade Onduleur -Bus continu -Redresseur.

1. Introduction .....	63
2. Description du montage.....	64
3. Onduleur de tension.....	65
3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux.....	65
3.2. Stratégie de commande.....	66
3.2.1. Algorithme de commande .....	67
4. Redresseur de tension .....	68
4.1. Modélisation du redresseur.....	68
4.2. Commande du redresseur en courant par hystérésis.....	68
5. Filtre .....	69
5.1. Modélisation du filtre .....	69
6. Régulation de la tension du bus continu.....	69
7. Simulation et interprétation .....	72
8. Conclusion .....	75

## Chapitre 5: Asservissement de la chaîne éolienne.

1. Introduction .....	76
2. Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne.....	77
2.1. Reproduction de la vitesse du vent.....	77
2.2. Modélisation du convertisseur éolien.....	77
2.2.1. Modélisation de la turbine .....	77
2.2.2. Modélisation du multiplicateur.....	79
2.2.3. Modélisation de l'arbre .....	79
2.2.4. Modèle global du convertisseur éolien.....	79
3. Technique d'extraction du maximum de puissance .....	80
3.1. Optimisation de l'extraction de puissance .....	80
3.2. Algorithme d'extraction de la puissance extraite.....	81
3.2.1. Commande avec asservissement de la vitesse du vent.....	81
3.2.2. Commande sans asservissement de la vitesse du vent .....	81
4. Simulation et interprétation .....	83
5. Conclusion .....	90

Conclusion générale .....	92
Bibliographie .....	94

Annexe A: Paramètres utilisés.

Annexe B: Paramètres des régulateurs.

# Notations et symboles

---

$V_1$	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
$V_2$	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
$V_n$	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
$V$	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
$S_1$	La section amont du tube d'air.
$S_2$	La section aval du tube d'air.
$F$	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
$\rho$	Masse volumique de l'air.
$R$	Rayon de la surface balayée par la turbine.
$P_{aero}$	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
$E_c$	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$C_{p\_max}$	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
$\lambda$	La vitesse relative de l'éolienne.
$\lambda_{opt}$	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
$\Omega_{opt}$	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
$G$	Gain du multiplicateur.
$C_g$	Couple résistant issue du multiplicateur.
$C_{aer}$	Couple aérodynamique de l'éolienne.

$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux.
$f$	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
$J$	Inertie totale de l'arbre.
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine.
$J_{mach}$	Inertie de la machine.
$X_{em}$	Grandeur électromagnétique.
$X_{ref}$	Grandeur de référence.
$X_{estimé}$	Grandeur estimée.
$f_r$	Fréquence rotoriques.
$g$	Glissement.
$P_{mec}$	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
MADA	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$ :	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
$\theta_s$	L'angle électrique entre l'axe $a_s$ et l'axe d.
$\theta_r$	L'angle électrique entre l'axe $a_r$ et l'axe d.
$\theta$	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique.
$\omega_r$	Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ ).

$\omega$	Vitesse angulaire de rotation.
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique.
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$R_s$	Résistance statorique.
$R_r$	Résistance rotorique
$l_s$	Inductance propre d'une phase statorique.
$l_r$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
$M_{sr}$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe $a_s$ coïncide avec l'axe $a_r$ .
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$L_r$	Inductance cyclique rotorique.
$L_m$	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
$P$	Puissance active statorique.
$Q$	Puissance réactive statorique.
$FT$	Fonction de transfert.
$FTBF$	Fonction de transfert en boucle fermée.
$FTBO$	Fonction de transfert en boucle ouverte.
$K_{ond}$	Gain statique de l'onduleur.
$K_p$	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
$K_i$	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
$\tau_r$	Constante de temps du régulateur.
$\gamma$	Perturbation du système.
$T_c$	Horizon de commande.
$T_f$	Horizon de filtrage.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions simples statoriques.
$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$	Tensions composées statoriques.
$S_a, S_b, S_c$	Etat des commutateurs de puissance.
$V_{dc}$	Tension continu.
$m$	Indice de modulation.
$f_p$	Fréquence de la porteuse.
$r$	Taux de modulation.
$U_p$	Amplitude de la porteuse.

---

$X_k$	Grandeur relative à la phase k.
$I_{red}$	Courant redressé.
$V_{res}$	Tension simple du réseau.
$V_{ond}$	Tension simple à la sortie de l'onduleur.
$V_{red}$	Tension simple à l'entrée du redresseur.
$R_f$	Résistance du filtre.
$L_f$	Inductance du filtre.
$P_{MLI1}$	Puissance transitée par l'onduleur.
$P_{MLI2}$	Puissance transitée par le redresseur.
$I_{MLI1}$	Courant dans le bus continu généré par l'onduleur.
$I_{MLI2}$	Courant dans le bus continu généré par le redresseur.
$P_c$	Puissance emmagasinée par le condensateur.
$I_c$	Courant dans le condensateur.
$P_f$	Puissance absorbée par le filtre.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

La source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques ou thermo solaires. Elle peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie hydrolienne (énergie des vagues) ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, son prix peut être maîtrisable sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production.

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones [1]. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur la MADA pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien. L'étude portera sur l'apport d'une MADA dans l'amélioration du rendement de l'éolienne, de par sa capacité à fonctionner à vitesse variable. Ce travail est structuré en cinq chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur l'éolienne accompagnées d'un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera reproduite. Celle-ci sera suivie par l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse variable sur les quatre cadrans. Ceci est possible à travers la mise en place de la double alimentation. L'une constante au stator, l'autre variable par la tension et la fréquence au rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle en P et Q.

Le troisième chapitre représentera la partie principale de cette étude. Il synthétisera trois types de régulateurs (PI.IP.RST).

A partir des commandes mises en place dans le chapitre deux, nous obtiendrons neuf combinaisons liant chacun des régulateurs au mode de contrôle précédemment cité. Ainsi, une comparaison pourra être réalisée, grâce à la simulation dont une analyse s'en est émanée en terme de suivi de consignes, de résistance aux perturbations et de robustesse.

Dans le chapitre quatre, nous nous intéresserons à la liaison du rotor avec le réseau. Cette liaison sera sous la forme d'une cascade composée d'un onduleur de tension commandée par une MLI triangulosinoïdale à une porteuse, d'un bus continu composé d'un condensateur lissant la tension et d'un redresseur alimentant l'ensemble à partir du réseau. Ce redresseur sera commandé par une MLI à hystérésis. Cette commande a été prise en compte afin d'éviter de dégrader le réseau en lui injectant des courants harmoniques importants.

Dans le cinquième chapitre seront abordées ; la modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible. Une simulation du modèle global d'une chaîne éolienne sera effectuée nous permettant ainsi de vérifier la viabilité d'un tel système dans un dispositif éolien.

Étant donné l'engouement pour ce procédé de production d'électricité par la communauté universitaire, les entreprises et les pouvoirs publics, nous nous proposons de mettre en évidence quelques perspectives de recherche pour l'amélioration du dispositif.

# Chapitre 1

## **Analyse du fonctionnement de la MADA pour la production de l'énergie éolienne.**

---

### **1. Introduction**

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée.

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes suivants.

## **2. Historique**

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au pays-Bas.

En 1890 Poul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en terme de puissance et de rendement durant tout le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise) [1]. La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [2].

## **3. Présentation du système éolien**

### **3.1. Définition de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [2].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

### **3.2. Types d'aérogénérateurs**

Un aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, ils se caractérisent par la position de leur axe de rotation et des performances qui leurs sont propres.

#### **3.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical**

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale [3].



*Figure 1.1 - Turbine à axe vertical.*

### 3.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine [3].

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales [4], ceci pour plusieurs raisons :

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ces raisons expliquent notre restriction à ce type d'aérogénérateur dans la suite de nos travaux.



Figure 1.2 - Turbine à axe horizontal.

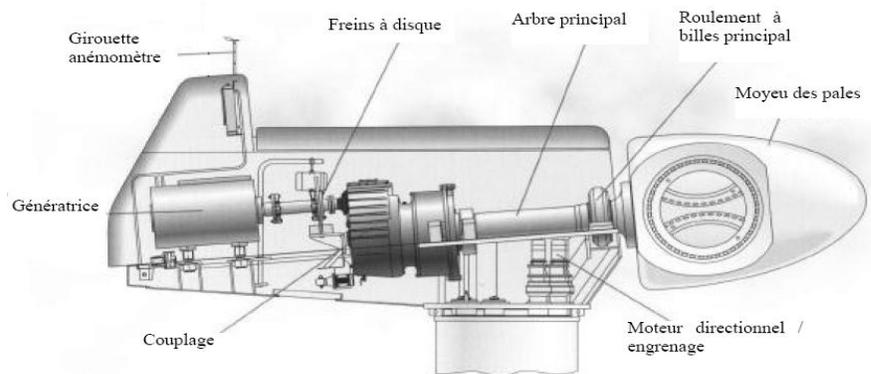
### 3.3. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale (Figure 1.4), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [21].

- La tour : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

- La nacelle : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (figure 1.3). Elle comprend les éléments suivants :
  - Arbre.
  - Multiplicateur.
  - Roulements.
  - Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
  - Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
  - Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).



*Figure 1.3 – Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.*

- Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

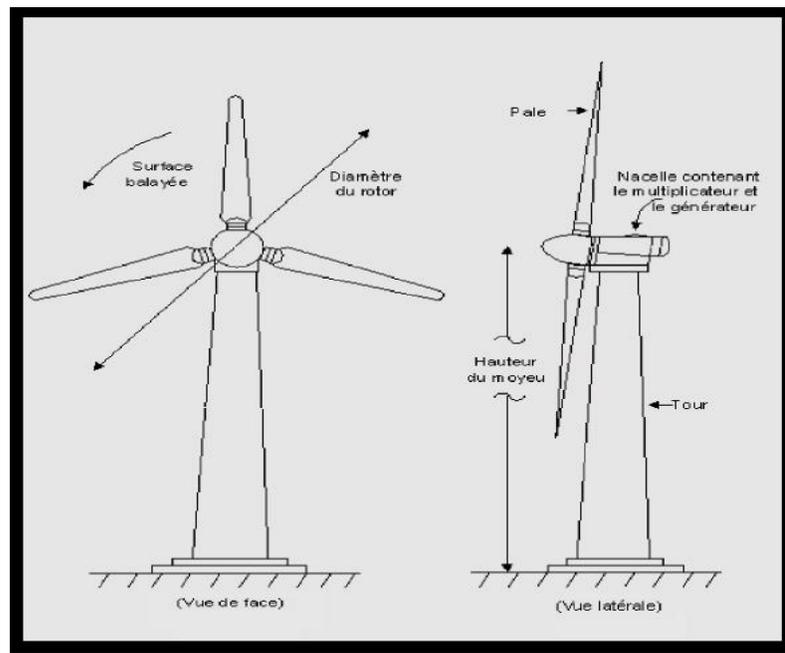


Figure 1.4 – Principales composants de l'éolienne à axe horizontale.

## 4. Conversion de l'énergie éolienne

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable, en d'autres termes sine qua non, de son utilisation pour la production de l'énergie électrique.

Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée.

### 4.1. Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  » [4]

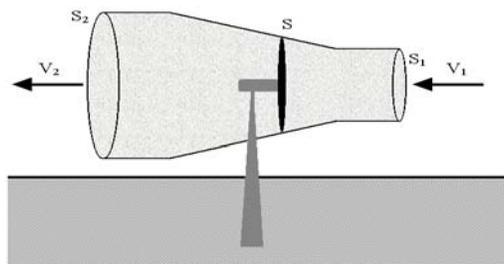


Figure. 1.5 -Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1-5 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. Désignant par  $V$  la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval du tube d'air et par  $S$  la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit [4], [5] :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.1)$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique  $E_c$  de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.4)$$

On en déduit:

$$V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (1.5)$$

En remplaçant l'expression de  $V$  dans les relations 1.2 et 1.3 on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (1.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 / 2 \quad (1.8)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est:

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}) \cdot (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)^2}{2} = C_p \quad (1.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.9), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_{aero}}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum pour

$\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$  qui égale à 0,59 (Figure 1.6). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

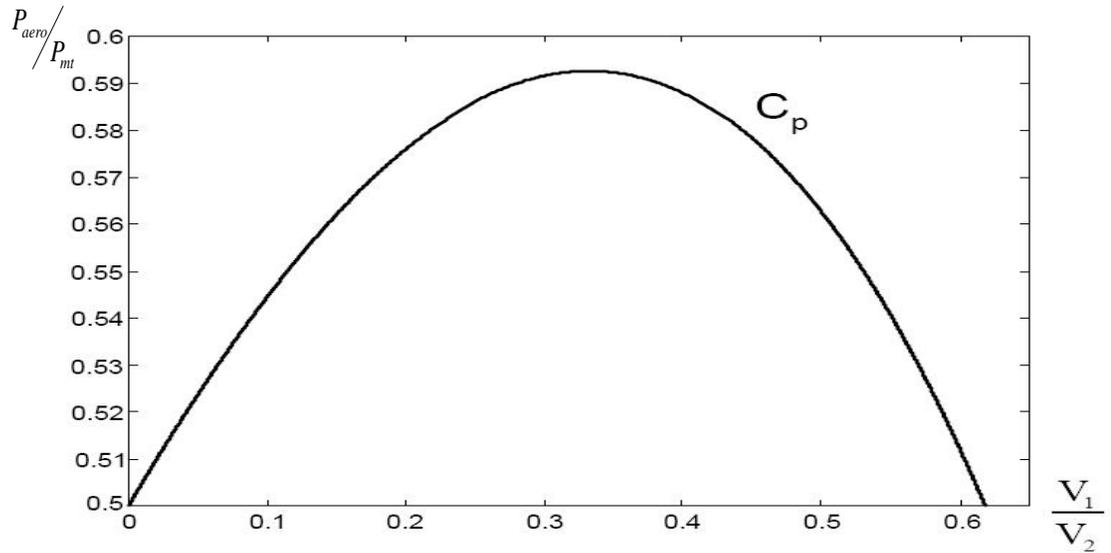


Figure 1.6 -Coefficient de puissance.

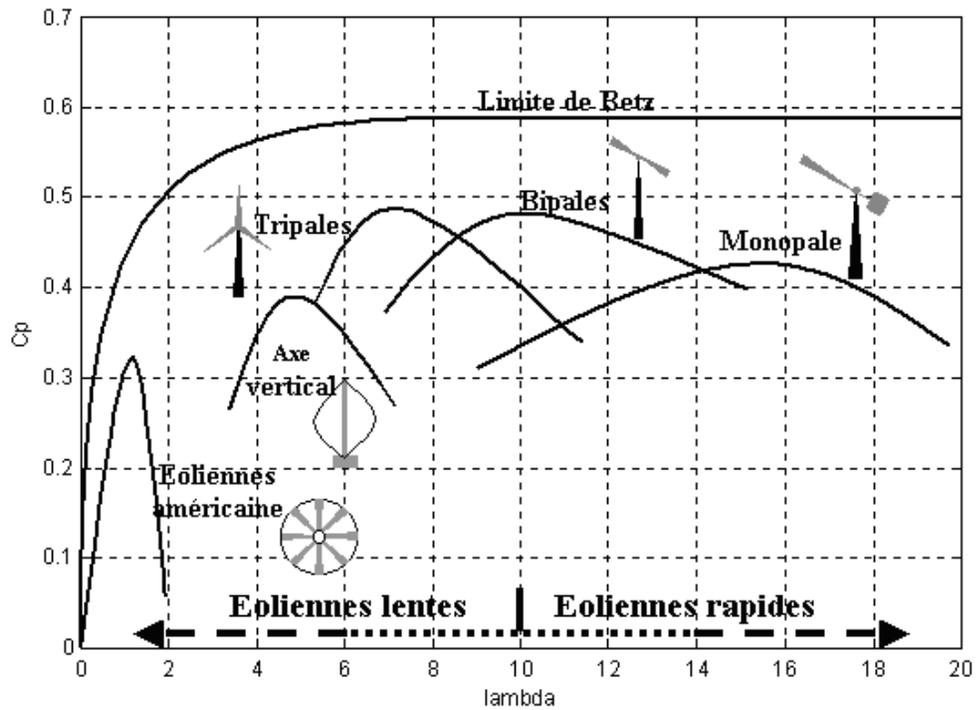


Figure 1.7 -Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1.7) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [5].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1.7) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

## 4.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique  $P_{aero}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left( \frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (1.11)$$

$\Omega_{turbine}$  : Vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

## 4.3. Utilité de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (1.8)

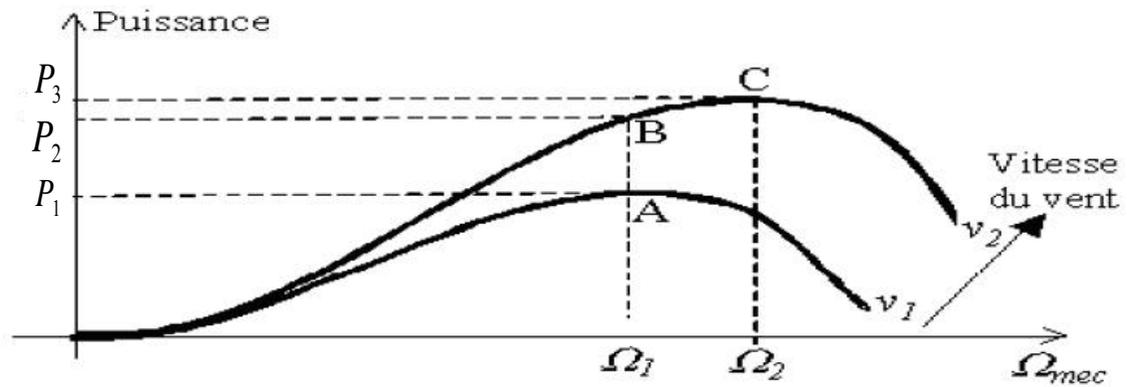


Figure 1.8 -Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour la vitesse du vent  $V_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on obtient une puissance maximale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $V_1$  à  $V_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (Vitesse fixe), une puissance  $P_2$  est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

#### 4.4. Modes de régulation

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit :

##### 4.4.1. Système à décrochage aérodynamique « stall »

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la

pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 1.9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [10].

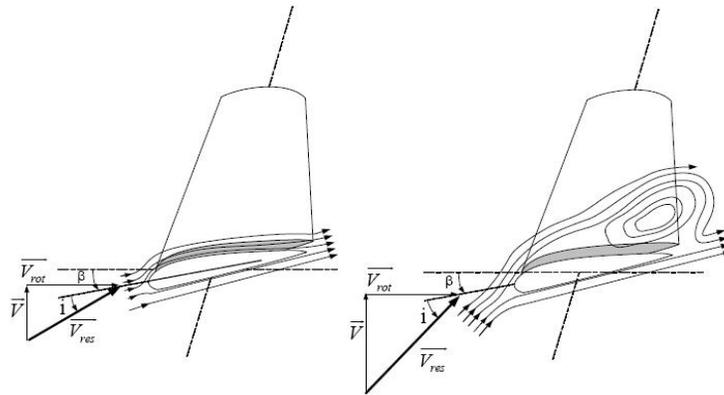


Figure 1.9 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

#### 4.4.2. Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure 1.10) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure 1.11) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

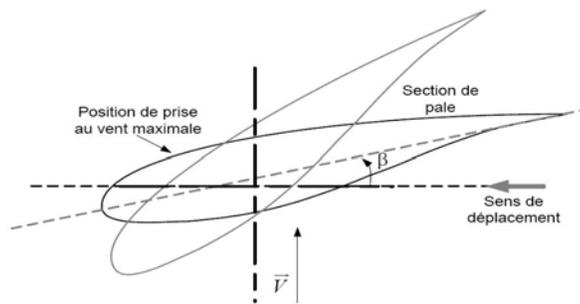


Figure 1.10 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

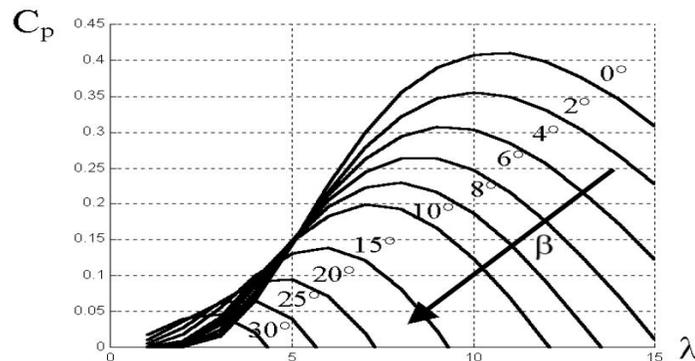


Figure 1.11 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

## **5. Conversion électromécanique**

La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation. Cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en électrique implique une génératrice couplée à la turbine.

### **5.1. Systèmes de génération d'électricité**

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. Nous avons pu les classer suivant trois variantes citées ci-dessous:

#### **5.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone**

Elle représente la configuration la plus répandue dans le monde. L'écoulement du vent dans la turbine étant en constante fluctuation, ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension.

#### **5.1.2. Systèmes utilisant la machine synchrone**

Le stator de cette machine est relié à une interface électronique composée d'un onduleur et d'un redresseur permettant d'assurer la circulation du flux de puissance tout en ayant deux fréquences différentes au stator et au réseau.

Dans ce système le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance nominale, impliquant des composants plus puissants et donc plus chers.

#### **5.1.3. Systèmes utilisant des machines spéciales**

Ce type de machines est communément appelé machines à reluctance variable. Elles peuvent être excitées par les courants triphasés au stator ou ne pas l'être. Ce type de machine reste à l'état de prototype et ne satisfait pas les critères de l'industrialisation [5].

## 5.2. Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

### 5.2.1. Principe de fonctionnement

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement [5]. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques  $f_r$ , est égale à  $g$  fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine [7]. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous (Figure 1.12):

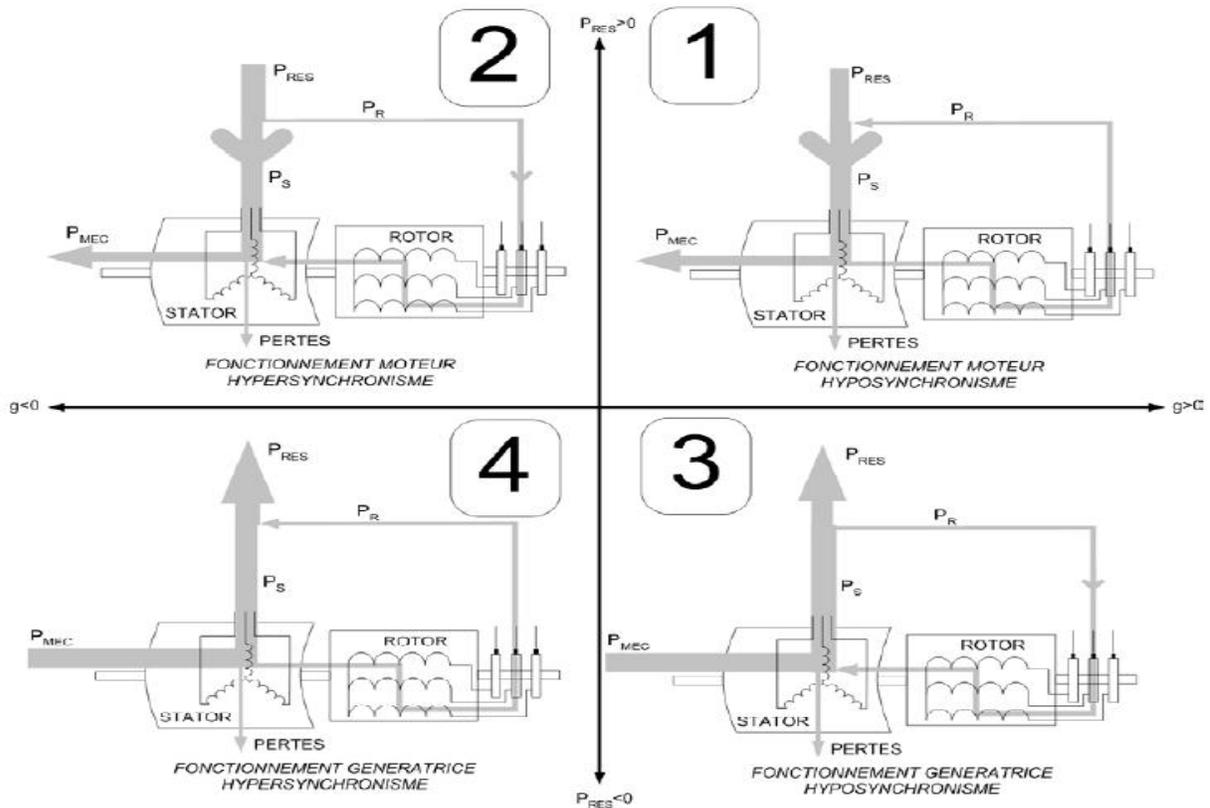


Figure 1.12 – Les différents modes de fonctionnement de la MADA.

### 5.2.1.1. Moteur en hypo synchronisme

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

### 5.2.1.2. Moteur en hyper synchronisme

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

### 5.2.1.3. Génératrice en hypo synchronisme

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hyposynchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le

fonctionnement générateur hyposynchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor.

#### ***5.2.1.4. Génératrice en hyper synchronisme***

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à  $g \cdot P_{mec}$  est transmise par l'intermédiaire du rotor.

### **5.2.2. Différentes topologies de la MADA**

A travers nos lectures, nous avons distingué deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un moteur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable. Ce dernier est appelé communément machine asynchrone à double alimentation (MADA). Toutefois il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement. Pour cela notre recherche s'est restreinte aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant toutes une MADA pour la conversion électromécanique.

#### ***5.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »***

Cette machine est à double stator (Figure 1.13). Un bobinage transite la puissance il a une grande section et est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques [9].

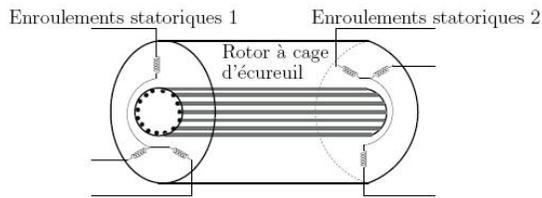


Figure 1.13 -MADA à double stator.

Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable. Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux. Cependant la machine a un stator plus volumineux et plus complexe à réaliser (Figure 1.14).

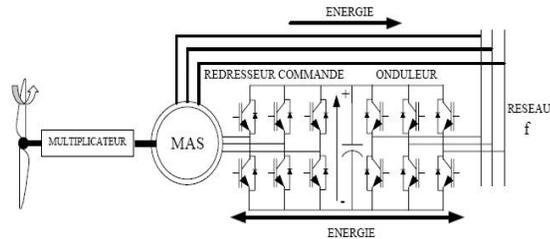


Fig. 1.147 - MADA Brushless.

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum. Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur.

### 5.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator identique aux machines asynchrones classiques. Son rotor est bobiné en étoile dont l'accès se fait grâce à un contact glissant. Le contrôle du fonctionnement de la machine se fait grâce à une fraction de la puissance nominale circulant dans le rotor. Cela implique un convertisseur réduit et donc moins coûteux. Il existe différents systèmes décrits ci-dessous :

#### 5.2.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scheibius avec cycloconvertisseur :

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor on utilise un cycloconvertisseur (Figure 1.15). L'ensemble est appelé structure Scheibius [5]. Grâce à la

bidirectionnalité du convertisseur, la plage de variation de la vitesse est doublée (de 70 à 130 % de la vitesse de synchronisme).

L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance.

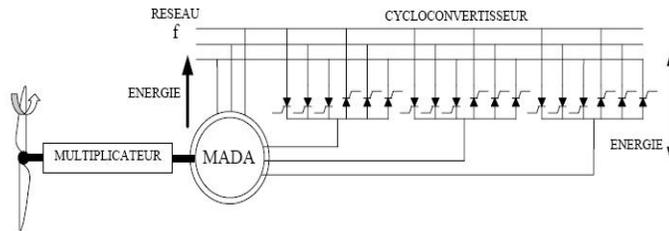


Figure 1.15 – Structure de Scheibius avec cycloconvertisseur.

#### 5.2.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation – Structure Scheibius avec convertisseur MLI :

Cette structure (Figure 1.16) repose sur le même principe que la précédente. À la place du cycloconvertisseur on utilise un montage Redresseur / Onduleur. Les transistors IGBT utilisés dans ce montage sont commandés à l'ouverture et à la fermeture, ceci implique la possibilité d'utiliser la MLI. Avec une commande appropriée, il est possible d'atténuer les harmoniques non nulles et d'améliorer le facteur de puissance.

Tout en ayant la même philosophie de fonctionnement que la structure « Bruchless » le dispositif « Scheibus » offre une simplicité de fonctionnement (présence d'un seul bobinage au rotor et au stator et donc un faible coût de fabrication et de maintenance). Le glissement est compris entre  $[-30, +30]$  %, le convertisseur est donc dimensionné pour 30% de la puissance nominale. La puissance produite n'est pas limitée à la puissance nominale car le rotor au fonctionnement hyper synchrone produit de l'énergie et la fournit au réseau. Cependant la commande MLI entraîne des gradients de tension importants d'où la présence de courants rotoriques de fréquences élevée responsable de pertes fer plus importantes. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien [5].

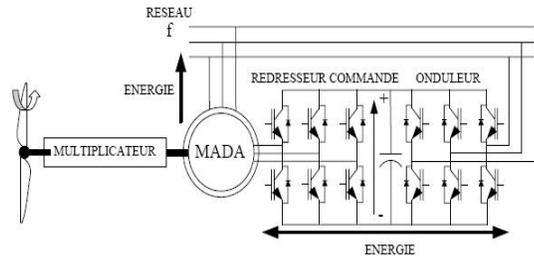


Figure 1.16 – Structure de scheibius avec MLI.

### 5.3. Application de la MADA dans le domaine éolien

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance (Figure 1.17).

La MADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine. (Figure. 1.18)

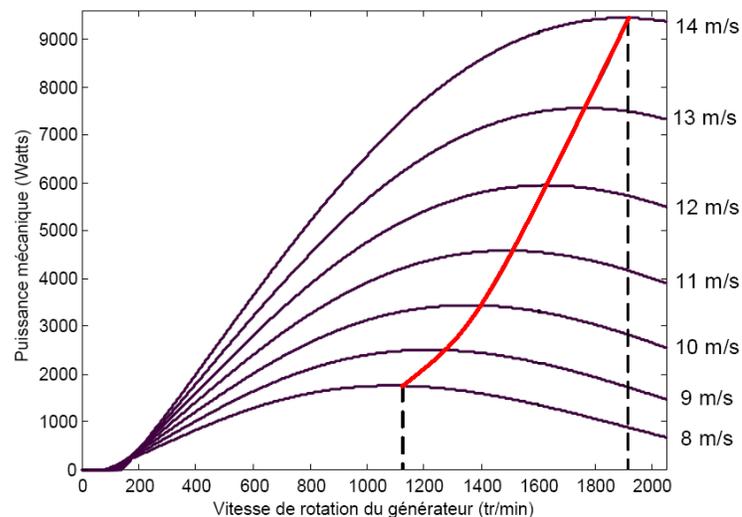


Figure 1.17 - Puissance produite par la turbine

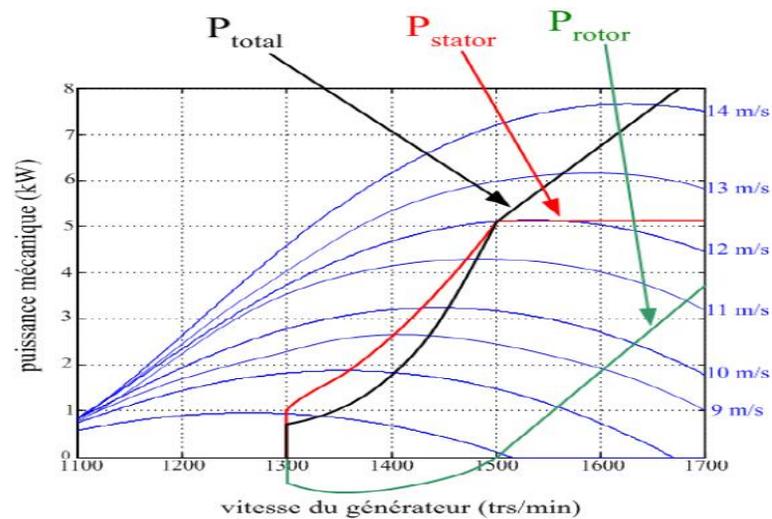


Figure 1.18 - Puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent.

## 6. Conclusion

A travers la synthèse bibliographique relative à la machine asynchrone à double alimentation nous avons pu noter le rôle de celle-ci et ses avantages par rapport aux autres convertisseurs conventionnels.

La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne.

La MADA devient une alternative à la machine synchrone ainsi qu'aux autres dispositifs de productions d'énergie électrique dans les réseaux isolés mais aussi en tant que génératrice d'appoint lors des pics de consommations. Car dans le cas des groupes électrogènes le fonctionnement à vitesse variable permet de réduire la consommation du carburant [5].

Etant donné que la structure cherbius avec convertisseur MLI offre une simplicité de fonctionnement et un faible coût de fabrication et de maintenance, nous nous baserons sur cette dernière dans la suite de notre travail.

## Chapitre 2

# Modélisation et stratégie de commande de la MADA.

---

## 1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que pour tirer le maximum de puissance éolienne, la génératrice doit fonctionner à vitesse variable.

Pour cela il faut établir une stratégie de commande permettant d'atteindre un rapport d'avance  $\lambda$  optimale. Une modélisation de la MADA est donc indispensable pour mettre en place une commande adéquate et performante.

Dans cette optique la MADA sera pilotée par les tensions rotoriques afin de nous permettre de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ceci sera très utile pour la gestion de l'éolienne.

## 2. Modélisation de la MADA

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

### 2.1. Hypothèses

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [9].

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoidalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoidales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

### 2.2. Modèle mathématique de la MADA

#### 2.2.1. Equations générales de la MADA

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.1)$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.2)$$

$$\text{où : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.3)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (2.4)$$

$$\text{Tel que : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\text{et } [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (2.3) et (2.4) dans, respectivement les relations (2.1) et (2.2), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (2.5)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (2.6)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((2.5) et (2.6)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure 2.1)

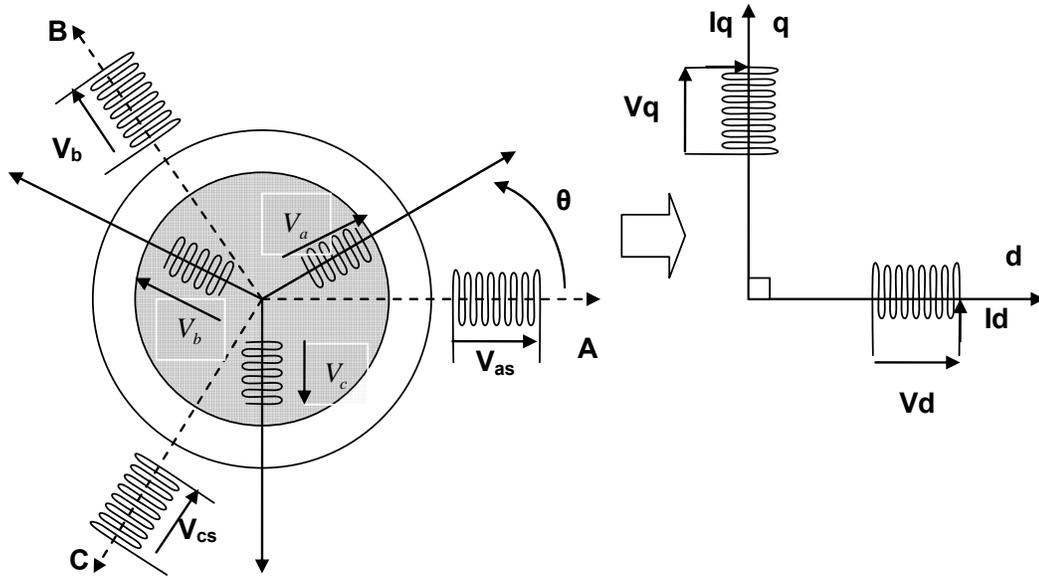


Figure 2.1 - Modèle de PARK de la MADA.

### 2.2.2. Modèle diphasé de la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [2]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [10]:

$$[P(\theta_s)] = c \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons  $c = \sqrt{\frac{2}{3}}$  [10].

Il est noté par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (**figure 2.2**),

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$ , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \tag{2.8}$$

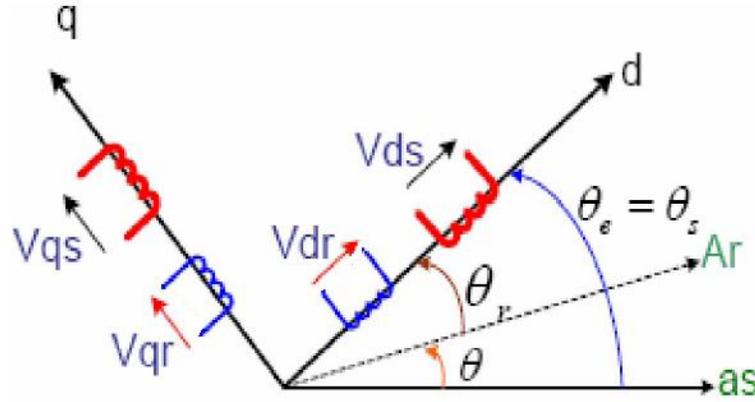


Figure 2.2 - Représentation de la machine dans le repère diphasé.

### 2.2.2.1. Equations des tensions

Appliquons la transformation de Park à l'expression (2.1) et en multipliant les deux membres de l'égalité par  $[P(\theta_s)]$  et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \tag{2.9}$$

L'expression (2.9) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

### 2.2.2.2. Equation des flux

Appliquons la transformation de Park à l'expression (2.3) :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sdq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{rdq} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s \\ L_m &= \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \end{aligned} \quad (2.13)$$

L'expression (2.12) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique:

$$L_r = l_r - M_r \quad (2.15)$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 2.2.2.3. Equation du couple électromagnétique

Parmi les différentes méthodes qui nous permettent d'exprimer l'équation du couple électromagnétique, deux méthodes sont distinguées. La méthode des travaux virtuels [11], et la méthode du bilan des puissances instantanées. Ainsi grâce à cette dernière, nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P \cdot (\Phi_{qr} \cdot I_{dr} - \Phi_{dr} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_e = P \cdot L_m \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (2.17)$$

## 3. Stratégie de commande de la MADA

Il a été montré dans le premier chapitre que l'utilité de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une référence de puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale. Ainsi une commande vectorielle de la MADA sera réalisée, celle-ci sera détaillée dans la suite de notre travail.

### 3.1. Commande vectorielle de la MADA

Le référentiel diphasé choisi est celui lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent [11]. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Afin de simplifier la commande de la machine, le vecteur flux statorique  $\Phi_s$  est aligné avec l'axe « d » du repère diphasé (Figure 2.3), d'où :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad (2.18)$$

$$\Phi_{qs} = 0 \quad (2.19)$$

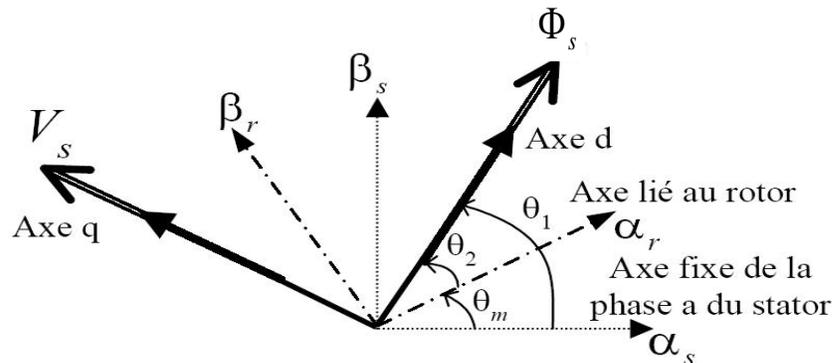


Figure 2.3 - vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \Phi_{ds} \quad (2.20)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux  $\Phi_{ds}$  devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé les tensions statoriques s'expriment par l'expression (2.1):

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s]$$

$R_s$  Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [13], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (2.21)$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable [3], [5], [6], [13], [19], les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (2.22)$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (2.23)$$

### 3.2. Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (2.23), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (2.24)$$

### 3.3. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (2.25)$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (2.26)$$

Ainsi en remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (2.27)$$

De l'expression (2.22) nous pouvons écrire :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (2.28)$$

D'où d'après (2.27)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (2.29)$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  prés imposée par le réseau.

### 3.4. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, da la façon suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (2.30)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.31)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.32)$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure 2.4).

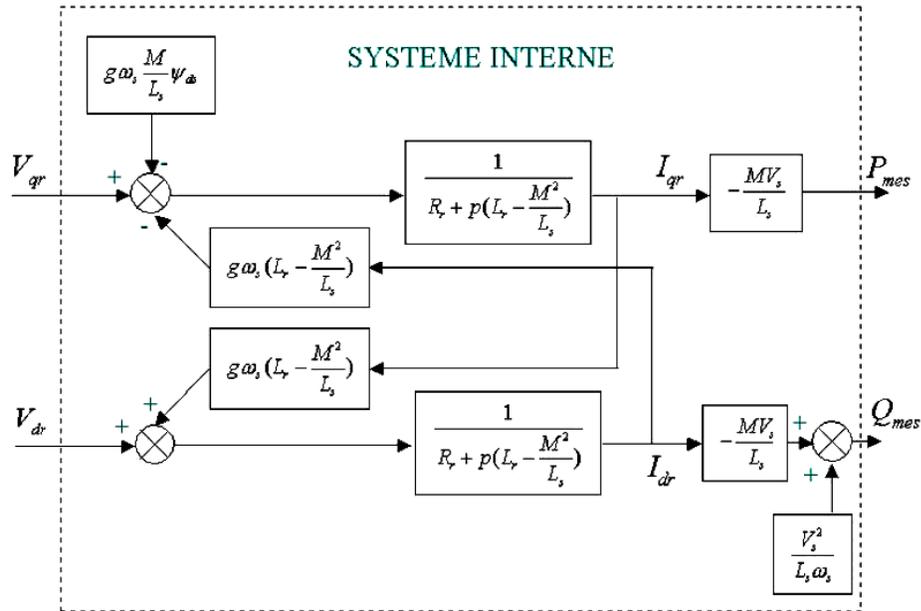


Figure 2.4 – Schéma bloc du système à réguler.

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques.  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure 2.5) et les courants rotoriques  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  comme des variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne  $P_{ref}$  et  $Q_{ref}$ .



Figure 2.5 – Bloc de contrôle à flux orienté.

Il est à noter que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Du fait du faible couplage entre les axes d et q (glissement faible) il est possible d'établir aisément une commande pour ce système. Ainsi les deux axes pourront être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Cette commande utilisant les puissances actives et réactives comme des consignes est appelée « Commande en P et Q ».

### 3.5. Etablissement des angles nécessaires aux transformations

Afin d'aligner le flux sur l'axe d, il suffit de retrancher de la phase des tensions statoriques  $\theta_s$  la valeur  $\pi/2$ . Cela permettra d'avoir un angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques telles que :

$$\theta_1 = \theta_s - \frac{\pi}{2} \quad (2.34)$$

Cette méthode (Figure 2.6) est fiable seulement dans le cas où les tensions statoriques sont stables en fréquence avec peu de fluctuations [5].

L'angle  $\theta_m$  étant celui que forme le rotor avec le stator, l'angle  $\theta_2$  nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques est :

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta_m \quad (2.35)$$

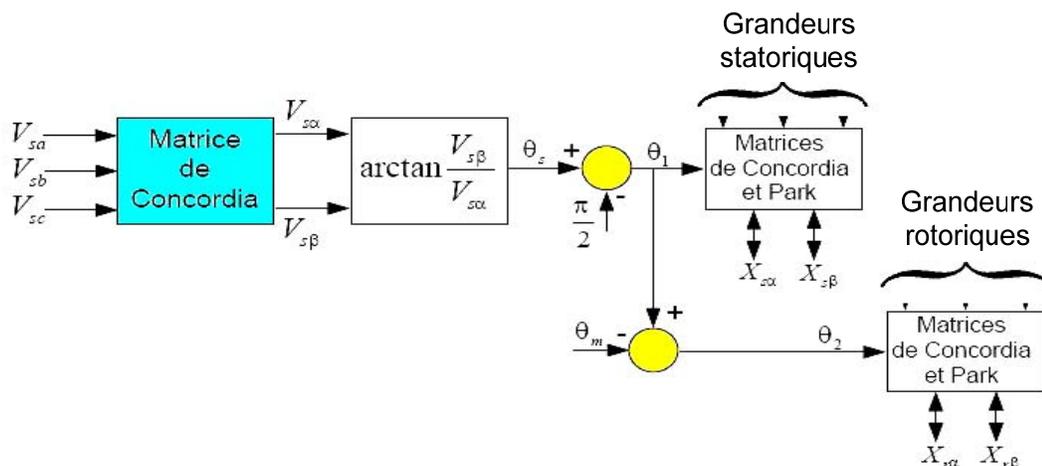


Figure 2.6 - Etablissement des angles pour les transformations de Park.

## 4. Calcule des tensions rotoriques de référence pour la commande en puissance active et réactive de la MADA

### 4.1. Principe général

Dans le souci de simplifier la synthèse des régulateurs, un certain nombre d'hypothèses ont été émises. Ceci dans le but de linéariser et de simplifier le modèle de la MADA (Figure 2.7).

- La première simplification consiste à considérer que la dynamique des onduleurs est très rapide par rapport à celle de la MADA. Le modèle de l'onduleur est réduit à son gain statique  $K_{ond}$  réduisant ainsi l'ordre du système :

$$\begin{cases} V_{dr} = K_{ond} \cdot V_{d-réf} \\ V_{qr} = K_{ond} \cdot V_{q-réf} \end{cases} \quad (2.36)$$

- La seconde simplification consiste à considérer les termes de couplage négligeables et donc les deux axes seront ainsi considérés comme découplés.
- La troisième simplification est de considérer le terme  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  constant car il est admis que le réseau est stable et très puissant. Ainsi, cette constante n'intervient pas dans la loi de commande.

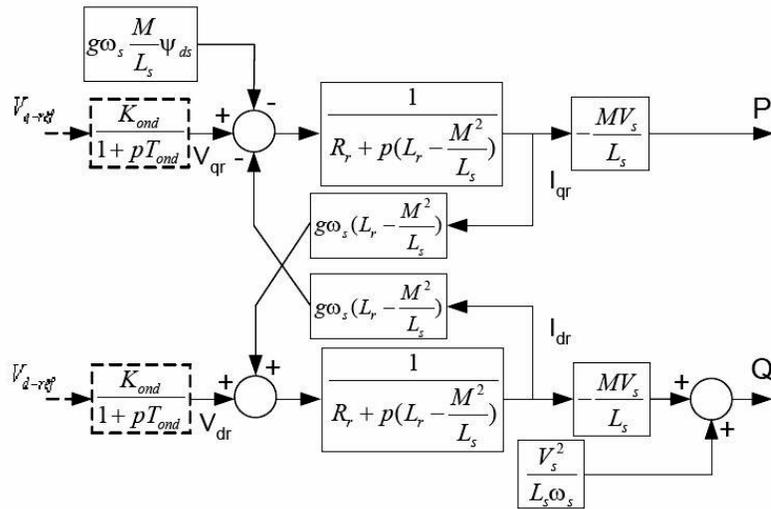


Figure 2.7 – Modèle de la MADA avec prise en compte de l'onduleur.

Ces hypothèses de travail nous permettent de changer le problème de commande multivariable en deux problèmes mono variables [5] (figure 2.8).

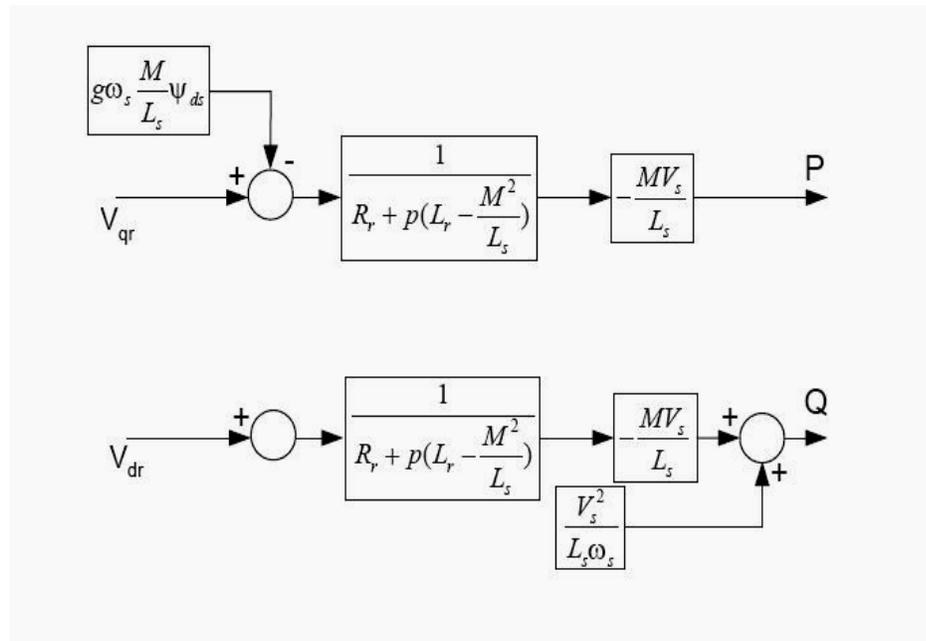


Figure 2.8 – Modèle simplifié de la MADA.

A partir du modèle précédent apparaissent deux solutions pour effectuer la commande en puissances de la MADA :

- La méthode directe consiste à réguler indépendamment chaque axe pour le contrôle des puissances. Les régulateurs de cette méthode contrôlent directement les tensions rotoriques d'où le nom explicite de ce type de commande.
- La méthode indirecte consiste à réguler indirectement les courants rotoriques. La consigne de ce type de régulation est estimée à partir des puissances de référence et le retour sur les comparateurs sera fait à partir des courants rotoriques directs et quadratures mesurés.

Il est à noter que d'autres configurations (Sans prise en compte des hypothèses simplificatrices) telles que la linéarisation autour d'un point de fonctionnement existent mais les performances obtenues ne sont meilleures qu'avec le modèle simplifié [13].

## 4.2. Commande directe

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices précédemment retenues, la commande directe sera réalisée par la mise en place d'une boucle de régulation sur chaque axe (Figure 2.9).

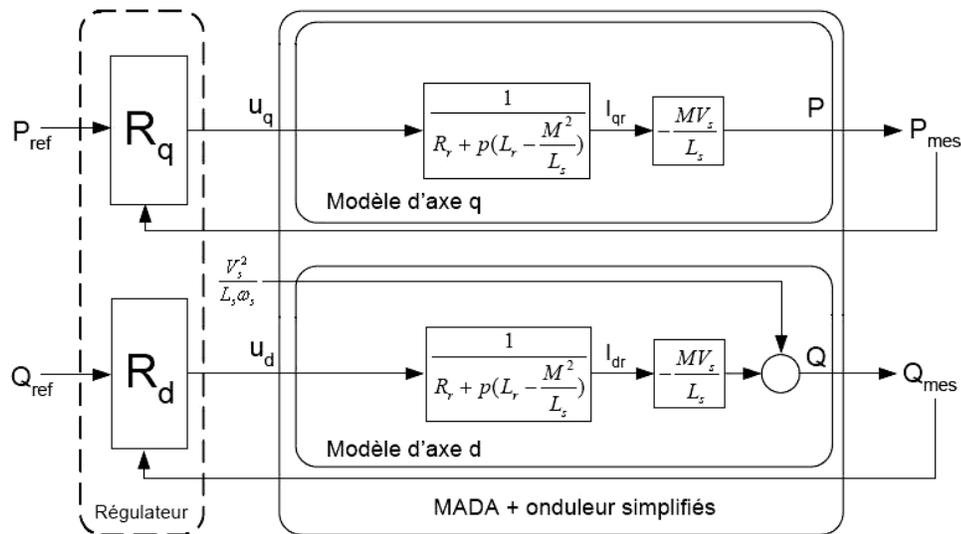


Figure 2.9 - Commande directe.

Le découplage entre ces axes étant considéré total, la régulation sera indépendante pour chacune des puissances active et réactive. Concernant la synthèse des régulateurs celle-ci sera détaillée dans un chapitre ultérieur.

### 4.3. Commande indirecte

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement. Cette démarche aboutit à un modèle qui correspond à celui de la MADA mais dans le sens inverse [3].

Nous aurons donc un bloc de commande constitué de deux sous-systèmes. Le premier (Figure 2.10) calcule les courants de référence à partir des consignes (Puissances actives et réactives), le deuxième (Figure 2.11) calcule les tensions de référence à partir des courants rotoriques calculés par le premier sous-système.

A partir du bloc de commande nous pouvons élaborer deux structures, l'une utilise une boucle régulant le courant, et l'autre se base sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

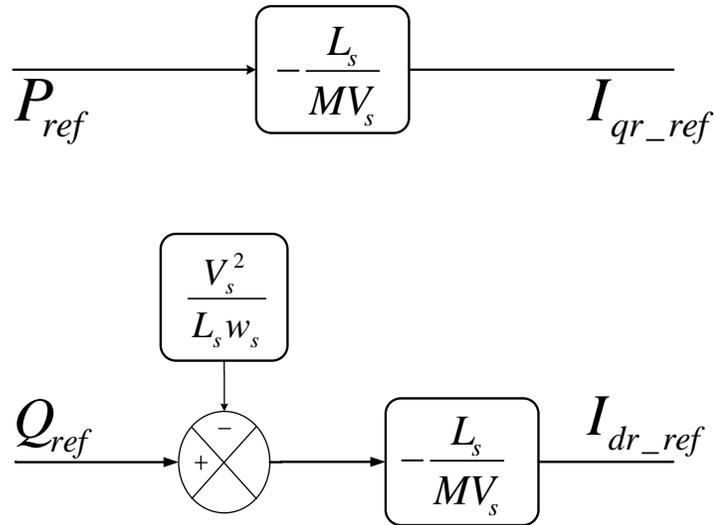


Figure 2.10 – Bloc de génération des courants de référence à partir des puissances de consigne.

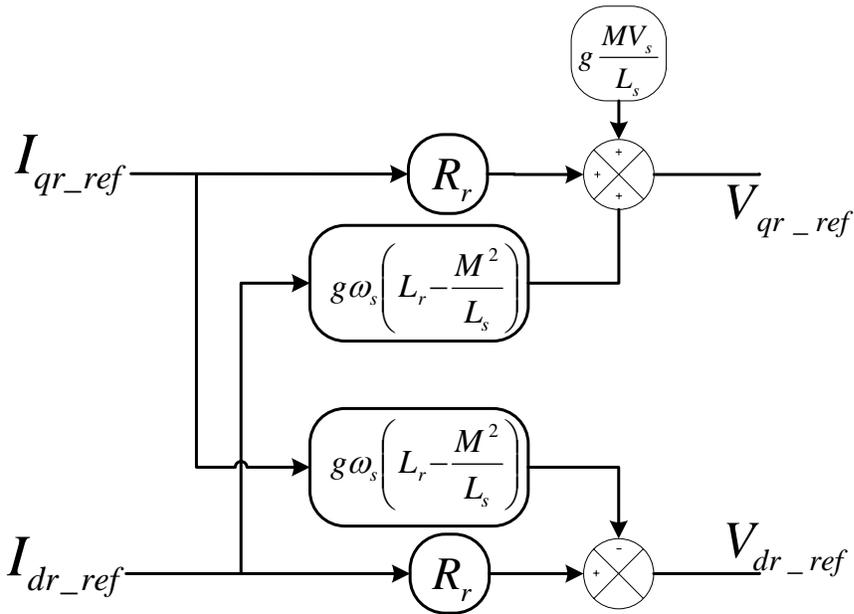


Figure 2.11 – Bloc de génération des tensions à partir des courants de référence.

### 4.3.1. Commande indirecte sans boucle de puissance

Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références telles qu’illustrées dans la (figure 2.12)

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.

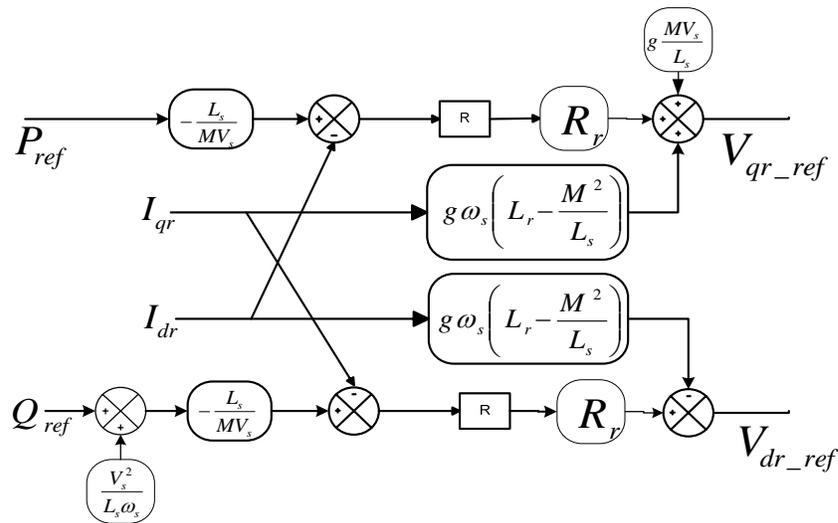


Figure 1.12 – Commande indirecte sans boucle de puissance.

### 4.3.2. Commande indirecte avec boucle de puissance

Ce type de structure (Figure 1.13) est composé de deux boucles, la première est celle du courant tel qu’effectuée dans la section précédente, et la deuxième boucle est celle des puissances. Ainsi on aboutit à une régulation de la puissance à partir de consignes que l’on impose.

Les gains des régulateurs de courants sont établis de la même manière que précédemment. Les régulateurs intervenants dans la boucle de puissance sont de type proportionnel intégral, car celui-ci offre des résultats suffisamment probants. Ces derniers seront illustrés dans le troisième chapitre.

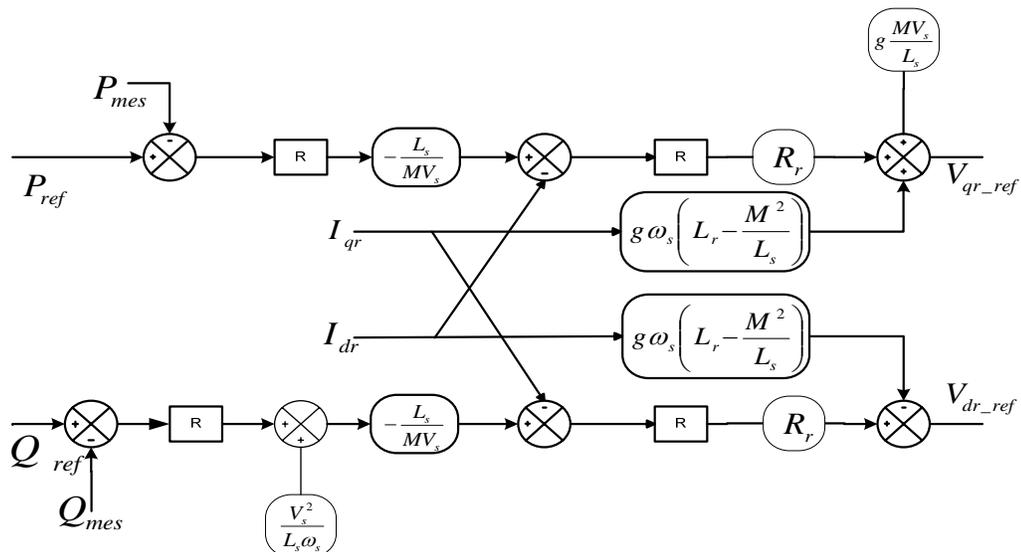


Figure 1.13 – Commande indirecte avec boucle de puissance.

## 5. Conclusion

Dans le but d'établir une commande vectorielle en P et Q, un modèle adéquat a été établi. Celui-ci permet le contrôle des puissances active et réactive statoriques à travers la régulation des tensions rotoriques.

Afin de permettre l'établissement de ce modèle un repère diphasé a été choisi rendant possible une simplification nécessaire pour la réalisation de la commande.

Ainsi, trois modes de contrôle ont été réalisés .Un mode direct dans lequel les puissances sont mesurées et comparées à leurs références. Un autre indirect où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances. Un troisième a pour rôle d'améliorer le suivi de consigne de la commande précédente en y ajoutant une boucle de puissance.

## Chapitre 3

# Synthèse des régulateurs et simulation

---

## 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été établi un modèle simplifié de la MADA. Celui-ci se réfère au principe d'orientation du flux statorique à partir de la commande des tensions rotoriques. En se basant sur le modèle précédent, une commande adaptée a été réalisée. Celle-ci contrôle les puissances actives et réactives statoriques en imposant des références aux onduleurs de tension alimentant le rotor. Dans cette optique nous allons procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires au bon fonctionnement des commandes précédentes régissant la MADA.

Une simulation des différentes combinaisons liant les modes de contrôle et les régulateurs étudiés sera effectuée. Ainsi il sera aisé de les comparer en terme de poursuite de trajectoire, de sensibilité aux perturbations et de robustesse.

## 2. Synthèse des régulateurs

Tel qu'il a été expliqué dans le chapitre précédent, la synthèse des régulateurs est la même pour chaque type de structures (directe et indirecte) (Figures 3.1 et 3.2). Pour éviter toute répétition une même étude sera effectuée. Celle-ci est valable pour chaque commande utilisée dans cet exposé. Ainsi trois types de régulateurs (PI, IP, RST) seront étudiés, cela sera la base théorique de la simulation dont les résultats seront exposés dans une section ultérieure. Dans le cas de la boucle externe de la commande indirecte, celle-ci est réalisée grâce à un régulateur PI. Sa synthèse suivra la même démarche que celle de la boucle interne.

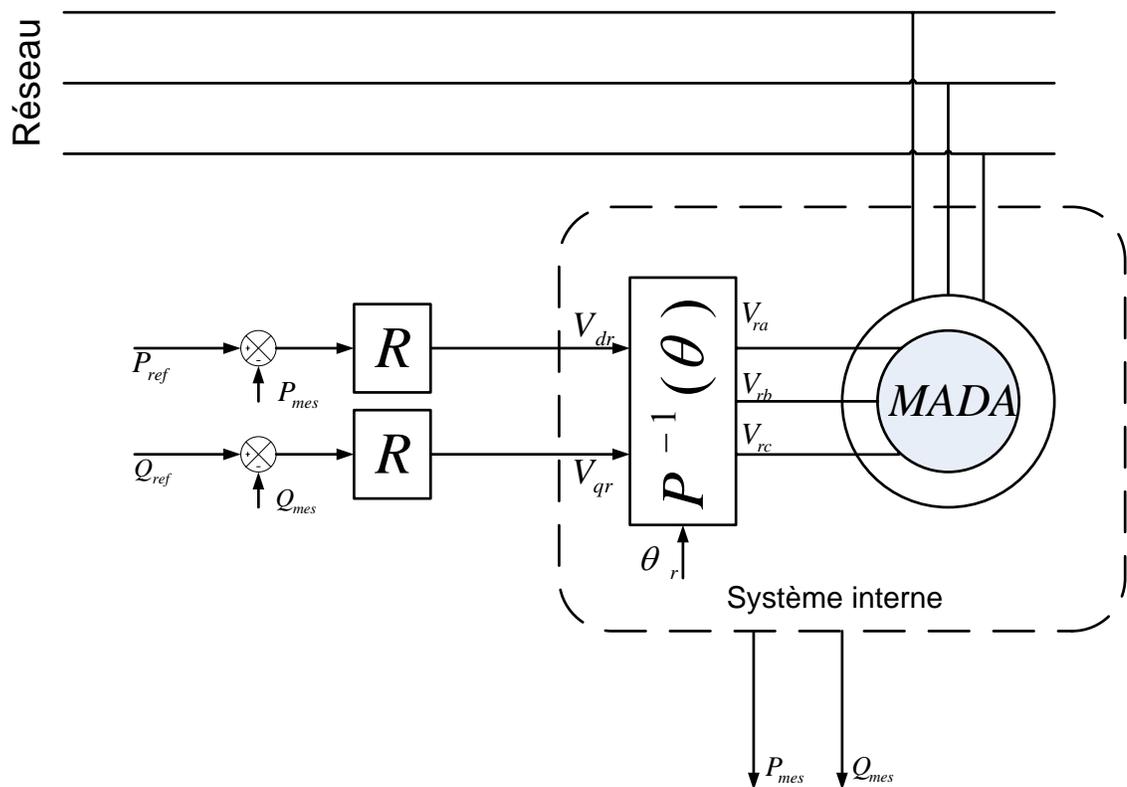


Figure 3.1 - Schéma bloc de la commande directe.

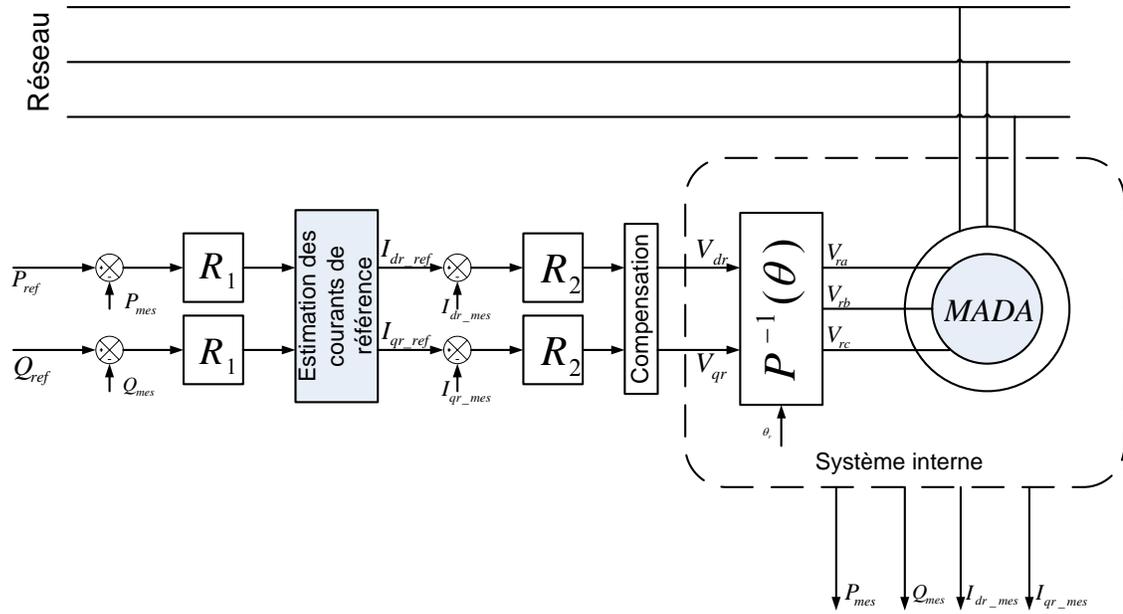


Figure 3.2 – Schéma bloc de la commande indirecte.

### 2.1. Régulateurs PI

Dans un premier temps une commande à base de régulateurs PI sera réalisée. Cette dernière en étant simple et rapide à mettre en œuvre, procure l’avantage d’avoir des performances acceptables.

Comme il a été illustré dans les paragraphes précédents, chaque axe comprend un régulateur de type PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{p}$ . Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité (Figure 3.3).

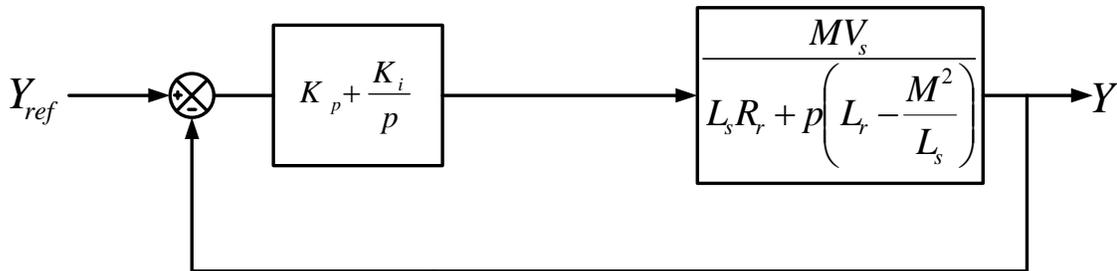


Figure 3.3 – Système régulé par un régulateur PI

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p} \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{K_p} \cdot p + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (3.1)$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs [5]. Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.2)$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M V_s}{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (3.3)$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (3.4)$$

Le temps de réponse  $\tau_r$  sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables [3].

Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{MV_s} \end{cases} \quad (3.5)$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre [5].

### 2.2. Régulateurs IP

Dans cette partie seront utilisés des régulateurs IP. Ces derniers sont analogues aux régulateurs PI sauf que les actions proportionnelles et intégrales sont mises en série contrairement aux régulateurs PI ou ces actions sont mises en parallèle (Figures 3.4 et 3.5) [14].

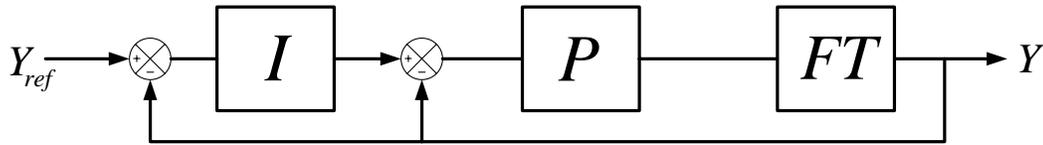


Figure 3.4 – Régulateur IP

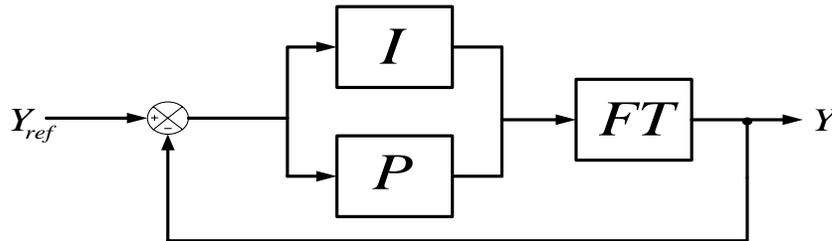


Figure 3.5 - Régulateur PI

Tel que décrit précédemment, la régulation du système se fait d'abord par la simplification de celui-ci en un modèle monovariante. Ainsi le modèle simplifié utilisé pour dimensionner les régulateurs PI le sera pour les régulateurs IP (Figure 3.6).

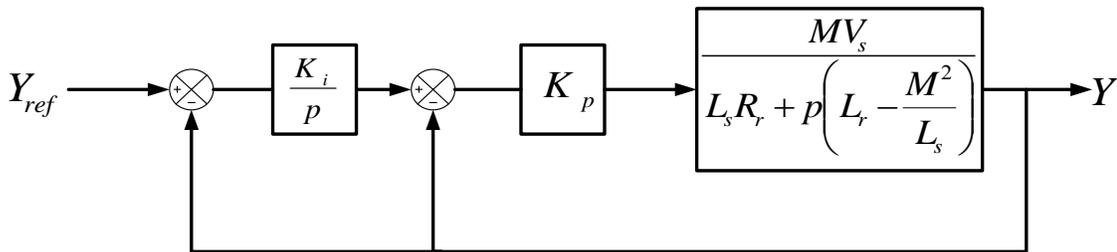


Figure3.6 – Système régulé par un régulateur IP

La fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) avec le régulateur IP s'écrit alors :

$$FTBF = \frac{K_i K_p A}{p^2 + (K_p A + B)p + K_i K_p A} \quad (3.6)$$

Tel que :

$$\begin{cases} A = \frac{MV_s}{L_s L_r - M^2} \\ B = \frac{L_s R_r}{L_s L_r - M^2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Par identification à un système de second ordre de fonction de transfert :

$$FT = \frac{K \omega_n^2}{p^2 + 2\xi \omega_n p + \omega_n^2} \quad (3.8)$$

Les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\begin{cases} K_i = \frac{\omega_n^2}{K_p A} \\ K_p = \frac{2\xi \omega_n - B}{A} \end{cases} \quad (3.9)$$

D'où en remplaçant A et B par leurs expressions respectives on obtient :

$$\begin{cases} K_i = \frac{\omega_n^2 (L_s L_r - M^2)}{K_p MV_s} \\ K_p = \frac{2\xi \omega_n (L_s L_r - M^2) - L_s R_r}{MV_s} \end{cases} \quad (3.10)$$

Le choix de  $\xi$  est fait de manière que le coefficient d'amortissement du système en boucle fermée soit optimal (environ 0.7) [14]. Quant à la dynamique du système ( $\omega_n$ ), elle sera choisie lors de la simulation afin d'avoir les meilleures performances.

### 2.3. Régulateurs RST

Un régulateur de type RST est polynomial, il est considéré comme une alternative aux régulateurs PI [5]. L'utilisation de ce type de régulateurs permet un meilleur compromis entre rapidité et performance. Les éléments R, S et T intervenant dans ce type de régulation sont des polynômes dont le degré est fixé suivant les fonctions de transfert de poursuite et de régulation en boucle ouverte.

Ces polynômes sont calculés à l'aide d'une stratégie de placement de pôles robustes [6]. Cette stratégie permet le réglage des performances de l'asservissement à l'aide de deux paramètres de synthèse ( $T_c$  et  $T_f$ ). Ces paramètres sont respectivement les horizons de commande et de filtrage à partir desquels sera défini le placement des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée [16].

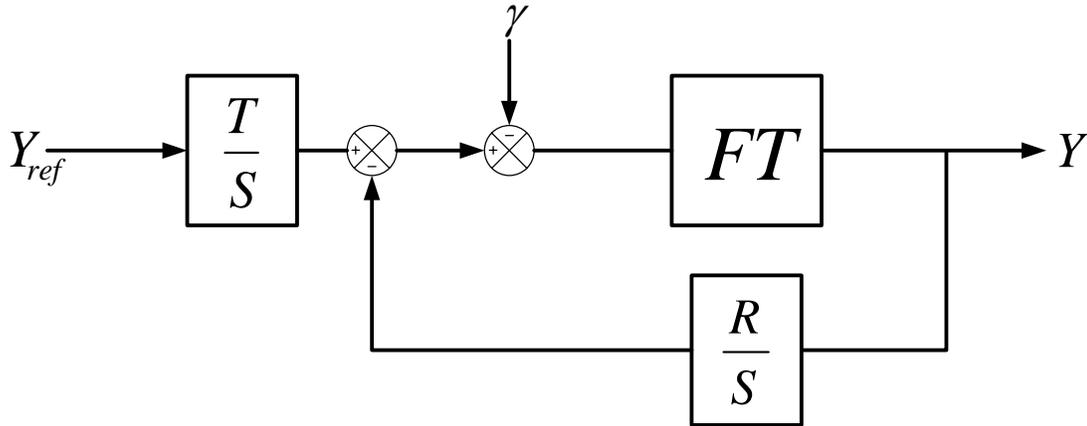


Figure 3.7 – Schéma bloc d'un système régulé par RST

Dans notre étude nous supposons la fonction de transfert du système à réguler de la forme  $\frac{A}{B}$ . Soit  $Y_{ref}$  la référence du système et  $\gamma$  sa perturbation. Afin de faire une régulation du système par placement des pôles robustes il faut placer respectivement les fonctions  $\frac{R}{S}$  et  $\frac{T}{S}$  sur la boucle de retour et à la référence (Figure 3.7).

Dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation traitée dans cette étude les termes A et B s'expriment par :

$$\begin{cases} A = L_s R_r + p L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \\ B = M V_s \end{cases} \quad (3.11)$$

Tel qu'illustrée dans la figure (3.7) la fonction de transfert du système en boucle ouverte s'écrit sous la forme suivante :

$$Y = \frac{BT}{AS + BR} Y_{ref} + \frac{BS}{AS + BR} \gamma \quad (3.12)$$

Le principe du placement de pôles consiste à spécifier un polynôme arbitraire de stabilité  $D(p)$  (correspondant au dénominateur des fonctions de transfert en poursuite et régulation) et à calculer  $S(p)$  et  $R(p)$  de sorte que conformément à l'équation de BEZOUT, l'on ait [5]:

$$D = AS + BR \quad (3.13)$$

La théorie de placement des pôles montre qu'une régulation strictement propre ( $\deg(S)=\deg(R) + 1$ ) permet un filtrage des bruits haute fréquence mais aussi un bon compromis entre performances et robustesse [5]. Cela s'accompagne d'une augmentation du temps de calcul [6]. Nous aboutissons donc au système suivant relatif au modèle de la machine asynchrone à double alimentation :

$$\begin{cases} A = a_1 p + a_0 \\ B = b_0 \\ D = d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 \\ R = r_1 p + r_0 \\ S = s_2 p^2 + s_1 p + s_0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Le polynôme  $D$  étant de degré 3, en respectant la stratégie de placement des pôles, nous sommes obligés de lui définir trois pôles. Ainsi il sera décomposé en produit de deux polynômes ( $D=CF$ ).  $C$  ayant un pôle simple et  $F$  un pôle double.

L'horizon de commande et l'horizon de filtrage sont définis tel que :

$$\begin{cases} T_c = -\frac{1}{P_c} \\ T_f = -\frac{1}{P_f} \end{cases} \quad (3.15)$$

$P_c$  et  $P_f$  sont les pôles respectifs des polynômes  $C$  et  $F$ . Le pôle de commande  $P_c$  a pour rôle d'accélérer le système, il est  $n$  fois supérieur au pôle du polynôme  $A$ . Pour accroître la robustesse de la régulation, les horizons doivent être déséquilibrés. Nous choisissons  $T_c$  égale à  $k$  fois  $T_f$ , les valeurs de «  $n$  » et «  $k$  » seront choisies judicieusement lors de la simulation pour mieux l'affiner.

Afin que la perturbation soit rejetée, il est nécessaire que  $S(0)$  soit nul [5] d'où

$$s_0 = 0 \quad (3.16)$$

Et ainsi on aboutit à un système de quatre inconnues régies par la matrice de Sylvester :

$$\begin{pmatrix} d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_2 \\ s_1 \\ r_1 \\ r_0 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Ce type de régulation ayant pour but d'égaliser la sortie à la référence ( $\frac{Y}{Y_{ref}} = 1$ ) en régime permanent, un choix doit être fait sur la valeur de T. Celui-ci doit vérifier la relation suivante [5] :

$$T = R(0) \quad (3.18)$$

Nous avons ainsi toutes les valeurs des coefficients des polynômes constituant la régulation RST.

Bien que ce type de régulation offre l'avantage d'améliorer la qualité du filtrage et un rejet des perturbations, nous avons un impact peu explicite des paramètres de synthèse sur les performances de l'asservissement mais aussi un ordre élevé des régulateurs utilisés.

### 3. Analyse des performances

Dans ce qui suit nous allons étudier les performances des différentes structures de commande ainsi que les différents types de régulateurs cités précédemment. La MADA sera connectée à un onduleur à deux niveaux qui est alimenté par une tension parfaitement constante. Cette analyse sera réalisée par simulation sur le logiciel MATLAB – SIMULINK. Plusieurs essais de performance et de robustesse seront établis. Afin d'étudier la viabilité des commandes précédemment réalisées, une comparaison sera naturellement effectuée pour déterminer la configuration la plus adéquate pour une application dans le domaine éolien.

#### 3.1. Suivi de consignes

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissances actives et réactives tout en maintenant une vitesse d'entraînement de la MADA constante.

##### 3.1.1. Conditions d'essai

- machine entraînée à 1410 tr/min.
- à t=1 s : échelon de puissance active ( $P_{ref}$  passe de 1000W à -4000W)

- à  $t=1,5$  s : échelon de puissance réactive ( $Q_{ref}$  passe de 1000 VAR à -1000 VAR)
- $U_c=800$ V
- $f_p=1000$  Hz

### 3.1.2. Résultats et interprétations

Les résultats de la simulation (Figures 3.8 à 3.12) présentent les différentes courbes des courants obtenues par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances actives et réactives statoriques ou autrement dit celle du couple et du flux.

La composante quadrature du courant rotorique  $I_{qr}$  contrôle le couple électromagnétique donc la puissance active. La composante directe contrôle le flux et donc la puissance réactive transitée entre le stator et le réseau. Cela est constaté lors des variations des composantes directes et quadrature des courants rotoriques qui sont respectivement les images des puissances réactives et actives.

En ce qui concerne le courant statorique, il est à noter que celui-ci a une forme quasi sinusoïdale pour les commandes indirectes avec régulateurs PI et IP, et donc pas d'harmoniques dans le stator qui peuvent causer des pertes fer supplémentaires. Quant aux autres configurations le courant reste pollué et donc nuisible au rendement de la machine.

Il est toutefois utile de noter que les composantes symétriques des courant rotoriques liés aux commandes « directe » et « indirecte en boucle fermée » utilisant respectivement les régulateurs PI et IP, oscillent avec une amplitude importante. Ceci nuit dangereusement au bobinage rotorique car le courant dans ce dernier atteint des proportions interdites. Ainsi à cause de ce constat, ces modes de contrôle associés aux régulateurs précédemment cités seront écartés pour une application expérimentale.

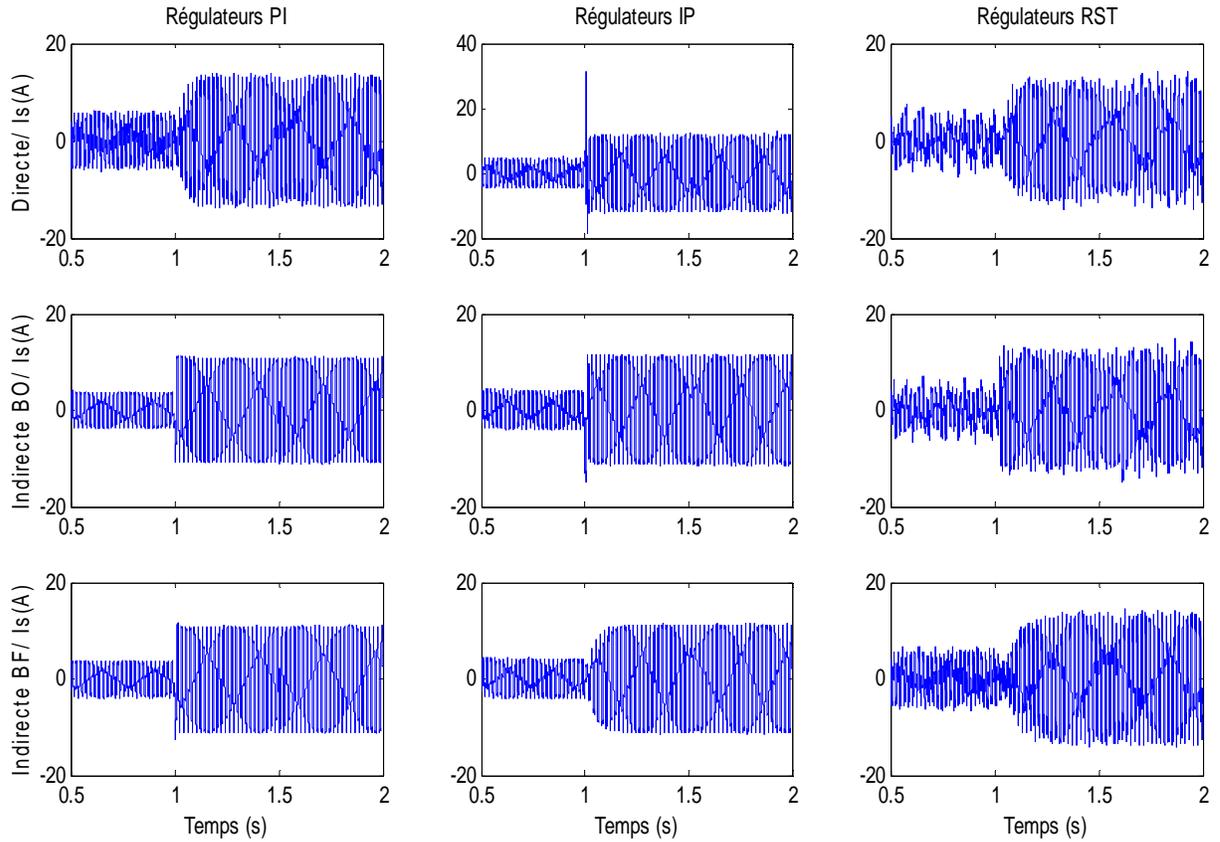


Figure 3.8 - Courant d'une phase statorique (Teste du suivi de consignes).

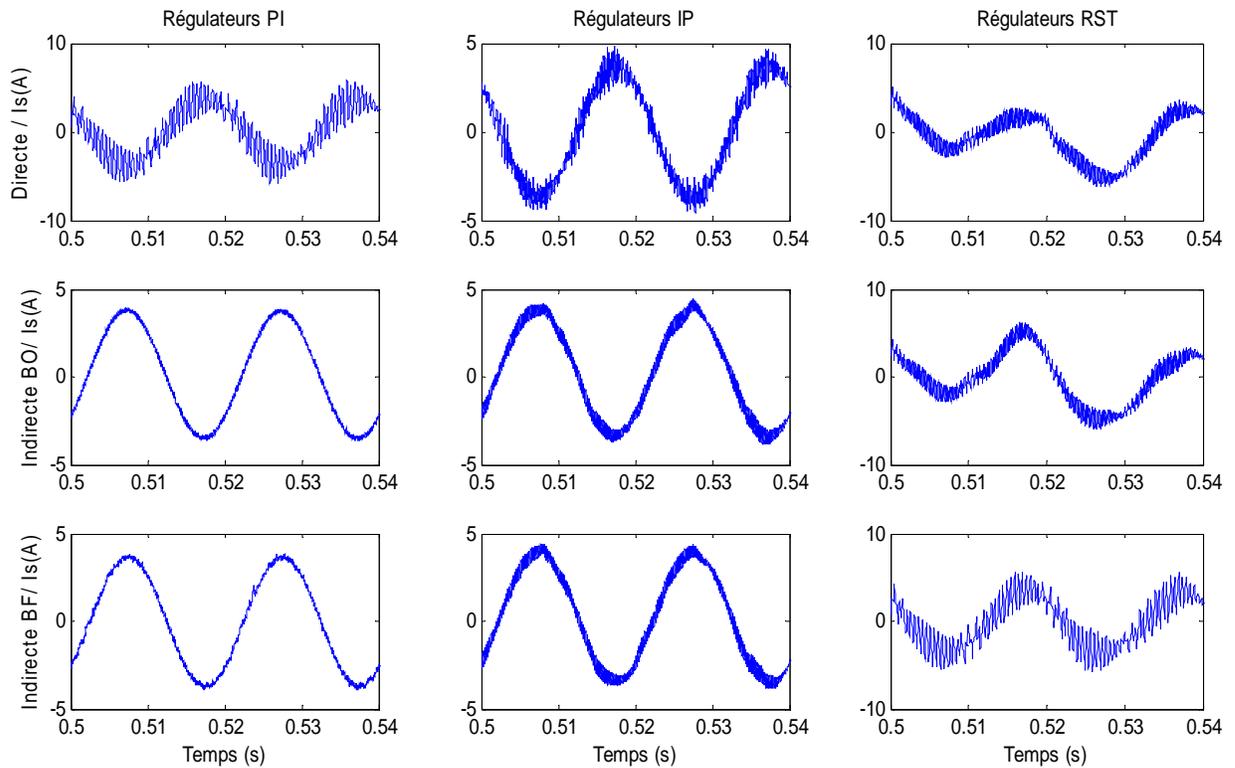


Figure 3.9 - Courant d'une phase statorique (Teste de suivi de consigne avec zoom).

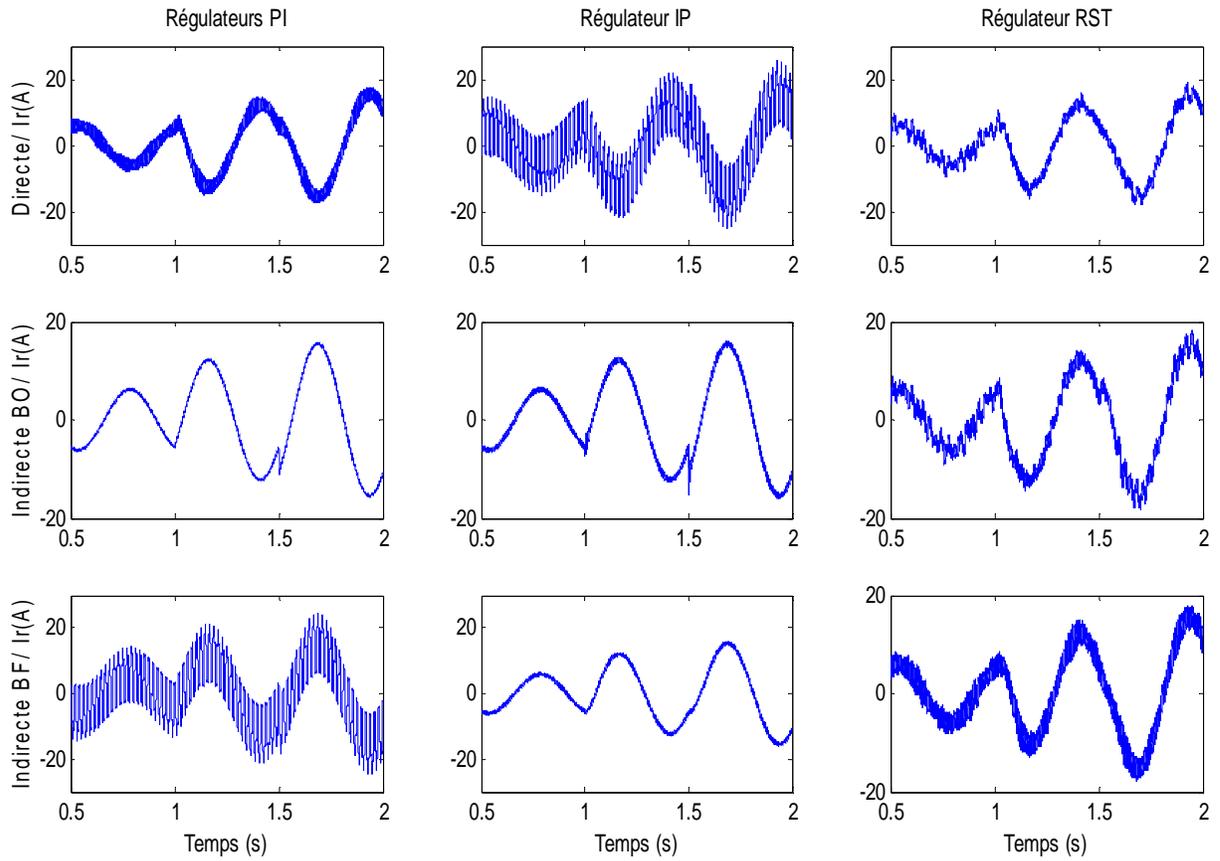


Figure 3.10 – Courant d'une phase rotorique (Teste du suivie de consignes).

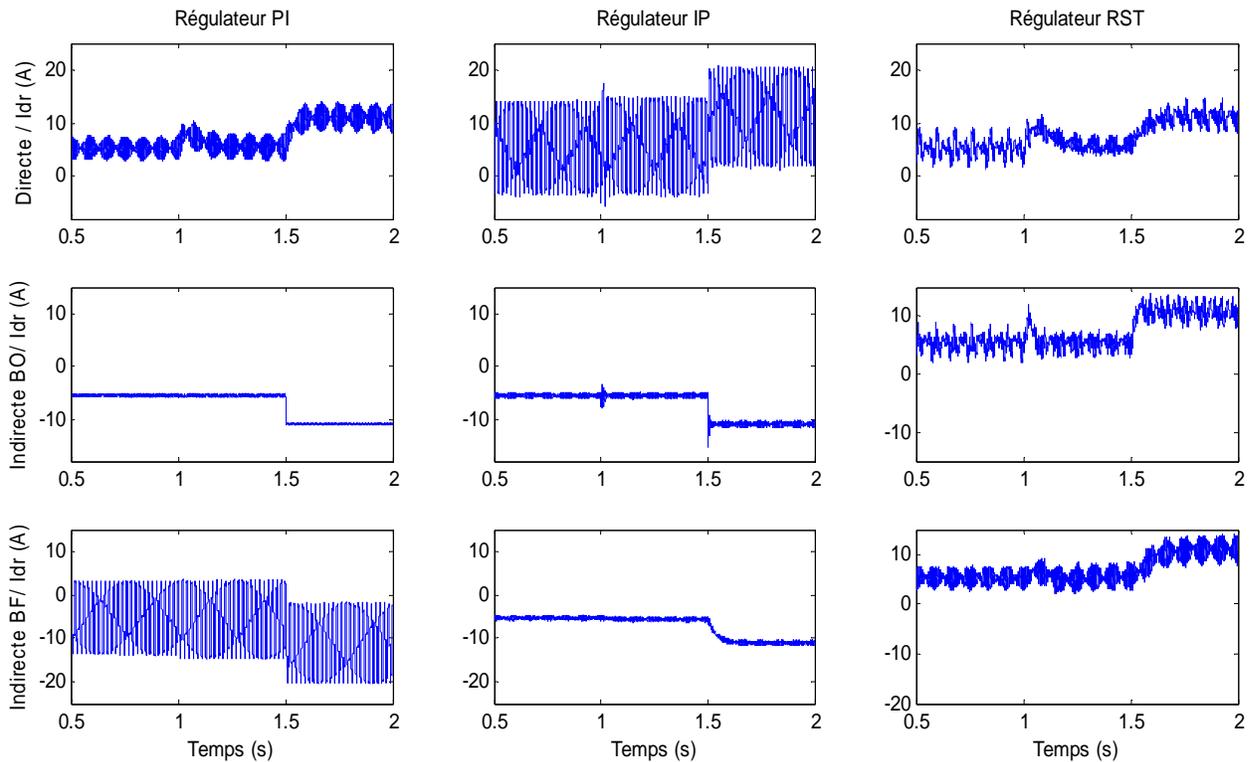


Figure 3.11 – Courant rotorique directe (Teste du suivie de consignes).

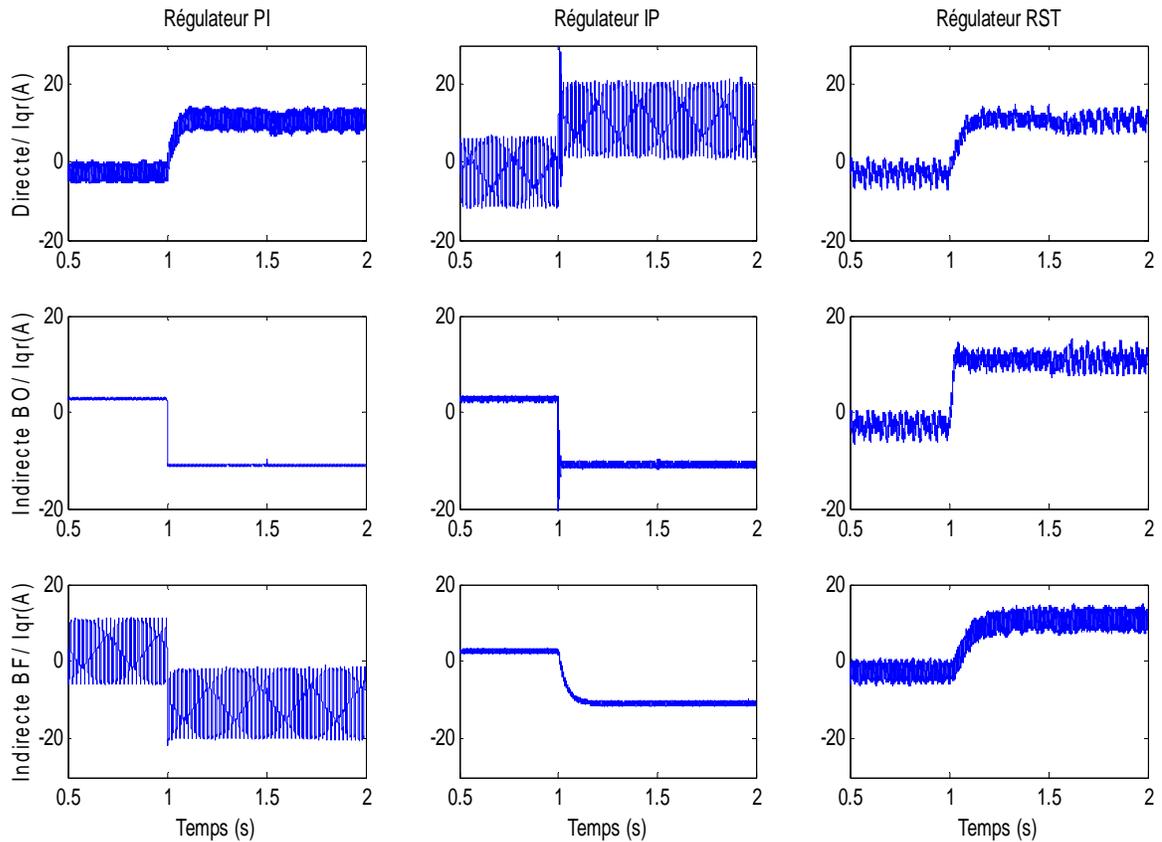


Figure 3.12 – Courant rotorique en quadrature (Teste du suivie de consignes).

Le but de la régulation précédemment établie étant la commande en puissance active et réactive de la MADA, il devient impératif d'analyser le suivi des consignes imposées (Figure 3.13 et 3.14). Dans cette optique il a été constaté dans le cas des régulateurs PI que la commande directe est plus lente que celles indirectes. Le suivi de consigne se fait avec un retard plus important. Un compromis a eu lieu pour limiter les oscillations autour de la référence. Car une constante de temps plus petite impliquerait une oscillation plus importante.

En ce qui concerne le découplage entre les axes directs et quadratures, il est à noter que celui-ci n'apparaît pas dans le graphe de la puissance active. Cependant dans celui de la puissance réactive l'influence de l'échelon de P y est visible. Néanmoins cette influence est moins conséquente dans la commande indirecte et encore plus dans celle avec une boucle de puissance. Aussi, il est constaté dans le cas de la commande indirecte que l'échelon de P est accompagné d'une erreur statique dans le suivi de consigne de la puissance réactive. Cette erreur est essentiellement due à la non considération de la résistance statorique dans l'estimation des courants rotoriques à partir desquels sont calculées les références des tensions rotoriques. Cet effet indésirable est atténué grâce au bouclage des puissances annulant ainsi la différence entre référence et grandeurs mesurées.

Les régulateurs IP apparaissent être équivalents aux régulateurs PI sur le plan du suivi de consignes. Néanmoins, il y apparaît un dépassement plus important celui-ci est atténué grâce au bouclage de la puissance. Le couplage y est plus visible sauf pour la commande directe qui semble mieux résister à l'échelon de P par rapport aux autres régulateurs.

Tel que constaté avec les régulateurs PI une erreur statique apparaît dans la mesure de la puissance réactive lors de la diminution de la puissance active. Ceci est aussi dû à la non prise en compte des résistances statoriques dans l'estimation des courants rotoriques.

Dans le cas des régulateurs RST l'amplitude des oscillations autour de la valeur de référence reste importante. Ceci est dû à la machine utilisée lors de la simulation dont la résistance statorique n'est pas négligeable. Ce phénomène peut être atténué en utilisant des convertisseurs multi niveaux.

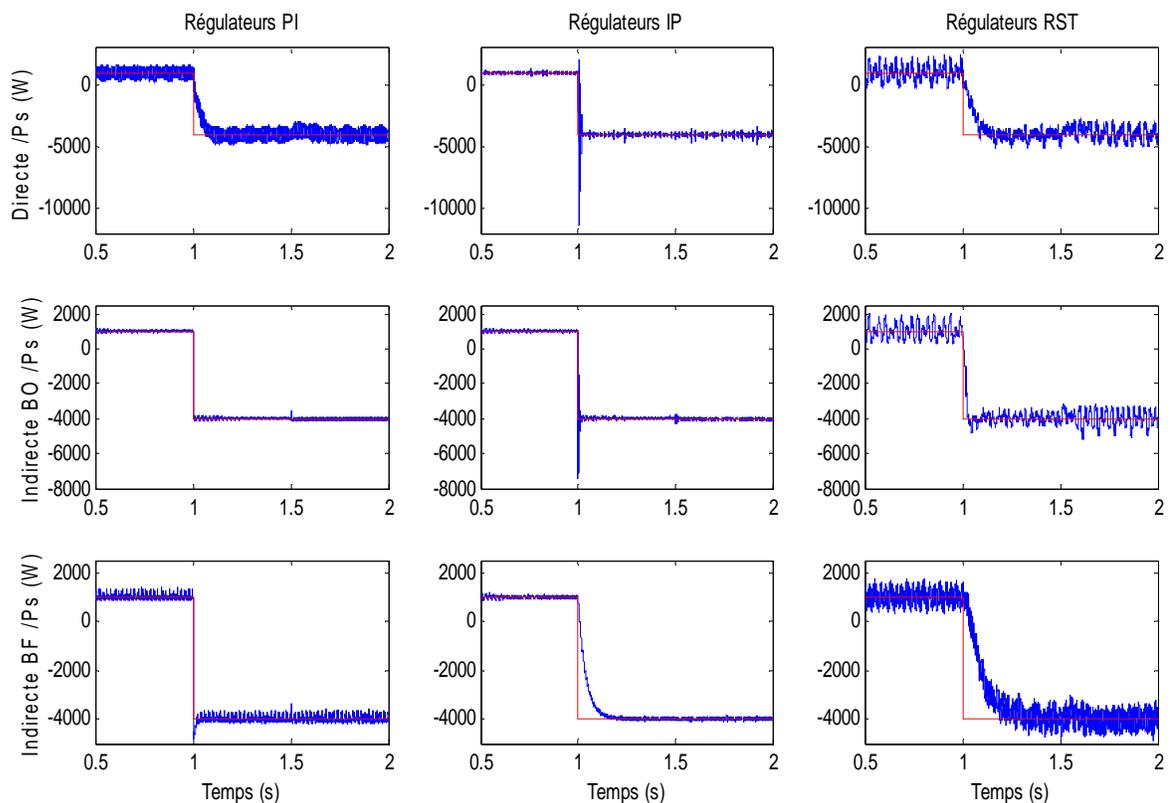


Figure 3.13 – Puissances actives statoriques (Teste du suivie de consignes).

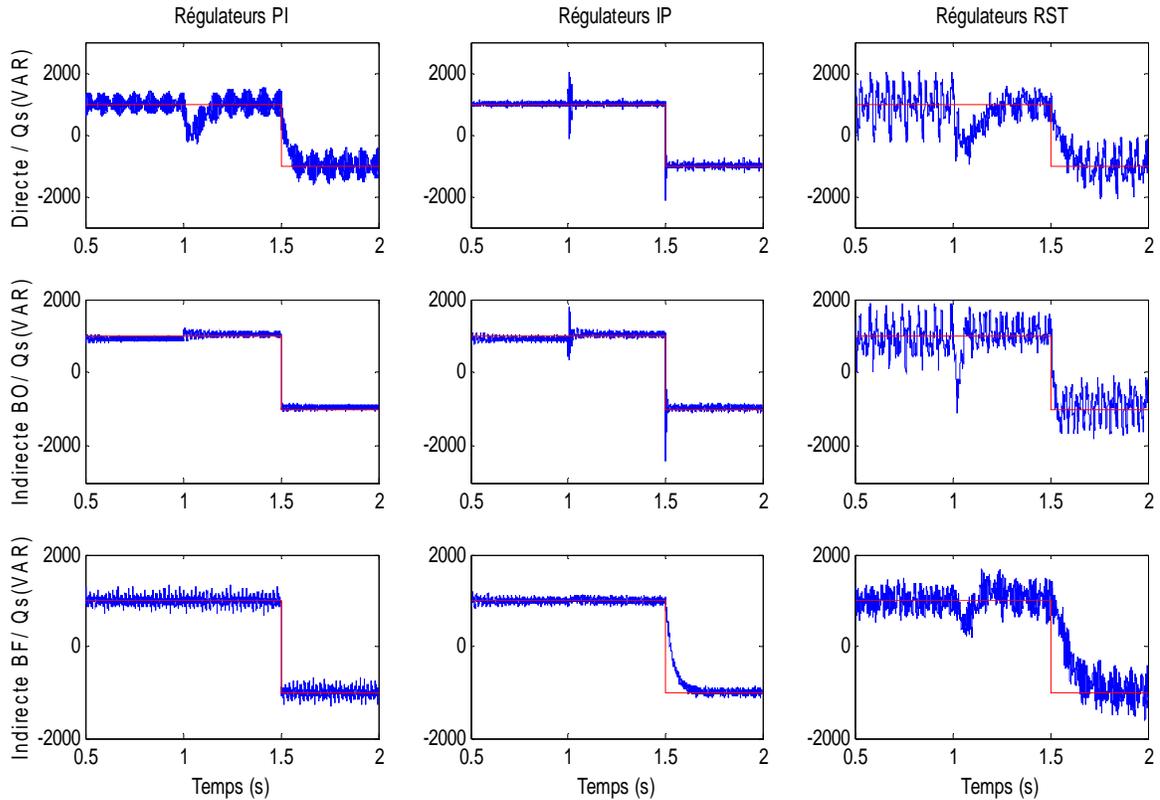


Figure 3.14 – Puissances réactives statoriques (Teste du suivie de consignes).

### 3.2. Performances

Cet essai nous permet de vérifier dans quelles mesures les puissances suivent leurs consignes lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

#### 3.2.1. Conditions d'essai

- à  $t=1$  s : échelon de vitesse de rotation ( $\Omega$  passe de 1410 tr/min à 1590 tr/min).
- La puissance active égale à -4000 W.
- La puissance réactive égale à -1000 VAR.
- $U_c=800$ V.
- $f_p=1000$  Hz.

#### 3.2.2. Résultats et interprétations

A travers les résultats obtenus (Figures 3.115 et 3.16) il est constaté que la machine réagit différemment aux perturbations de vitesse d'entraînement suivant la commande utilisée.

Celle-ci a d'autant plus d'effet pour la commande directe, que pour la commande indirecte pour laquelle l'effet de la perturbation est moins important. Il l'est particulièrement pour la commande à boucle de puissance fermée, car la perturbation est pratiquement annulée avec ce type de commande. Il est constaté dans le cas de la commande directe que les régulateurs IP rejettent plus efficacement les effets de la perturbation de la vitesse. Néanmoins, dans le cas de la commande indirecte les régulateurs PI et RST donnent des résultats probants.

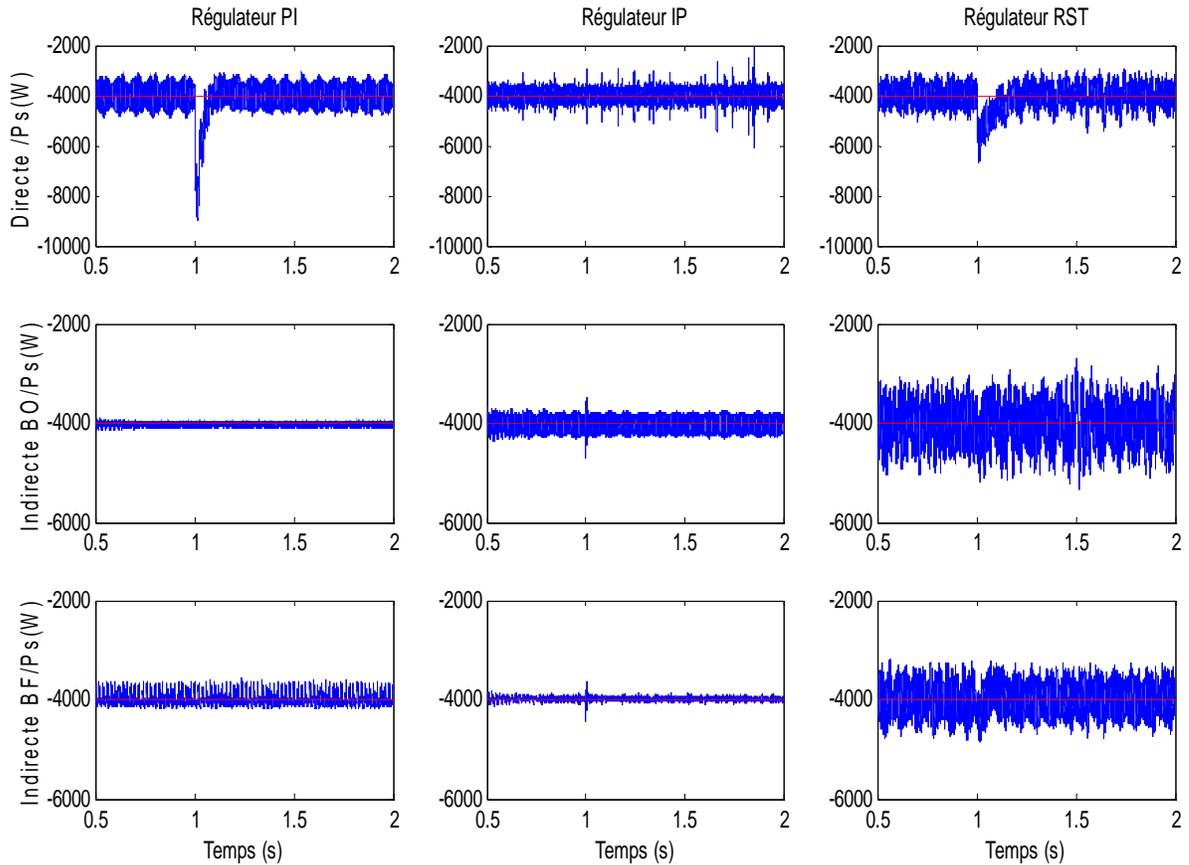


Figure 3.15 – Puissances actives statoriques (Teste de performances).

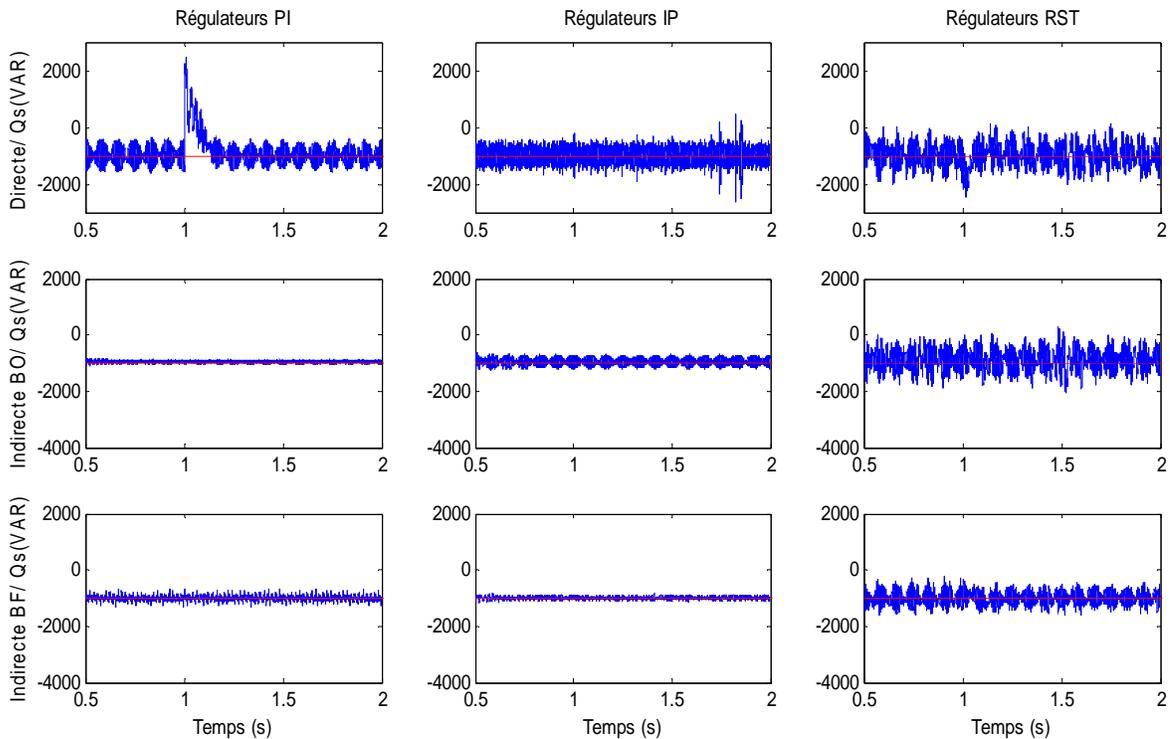


Figure 3.16 – Puissances réactives statoriques (Teste de performances).

### 3.3. Robustesse

Cet essai consiste à faire varier les paramètres du modèle de la machine et de voir si la régulation reste dans les limites des contraintes fixées par le cahier des charges. Cette étude est très importante car dans un système réel les paramètres de la machine sont soumis à des variations causées par différents phénomènes physiques (Saturation et échauffement). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est astreinte à des imprécisions dues à la méthode employée ou aux appareils de mesure.

Dans cette optique plusieurs essais de simulation seront réalisés. Ces essais consistent à varier chaque paramètre de la machine indépendamment des autres. Ceci nous permettra de cibler la grandeur pour laquelle les commandes précédemment établies ne sont pas robustes. Ainsi cette démarche nous incitera à prendre les précautions nécessaires pour le maintien de la grandeur précédemment citée mais aussi l'amélioration de la précision de sa mesure.

### 3.3.1. Conditions d'essais

Afin de faire une analyse objective de la robustesse de la commande, il est impératif de mettre celle-ci dans les conditions les plus défavorables admises par le constructeur. Pour cela les résistances augmentent de 50% et les inductances diminuent de 50% à cause des effets respectifs de la chaleur et de la saturation. La vitesse sera constante égale à 1410 tr/mn et  $f_p = 1000$  Hz.

#### 3.3.1.1. Essai 1:

- à  $t=1.5$  s : échelon de puissance réactive ( $Q_{ref}$  passe de 1000 VAR à -1000 VAR).
- à  $t=1$  s : échelon de puissance active ( $P_{ref}$  passe de 1000 W à -4000W).
- La résistance statorique augmente de 50% sans variation des autres paramètres.

#### 3.3.1.2. Essai 2 :

- à  $t=1$  s : échelon de puissance réactive ( $Q_{ref}$  passe de 1000 VAR à -1000 VAR).
- à  $t=1,5$  s : échelon de puissance active ( $P_{ref}$  passe de 1000 W à -4000W).
- La résistance rotorique augmente de 50% sans variation des autres paramètres.

#### 3.3.1.3. Essai 3 :

- à  $t=1$  s : échelon de puissance réactive ( $Q_{ref}$  passe de 1000 VAR à -1000 VAR).
- à  $t=1,5$  s : échelon de puissance active ( $P_{ref}$  passe de 1000 W à -4000W).
- Les inductances diminuent de 50% sans variation des autres paramètres.

### 3.3.2. Résultats et interprétations

Lors des variations des résistances statoriques et rotoriques (Figures 3.17 à 3.20), nous n'avons constaté aucun effet sur le suivi des consignes. Cependant, dans le cas des régulateurs IP, il est à remarquer que la commande directe devient instable avec une énergie réactive négative. Ceci est observé à partir de  $t=1.5$  s quand  $Q$  passe de 1000 VAR à -1000 VAR. Ce passage est accompagné de l'augmentation des oscillations autour de la référence.

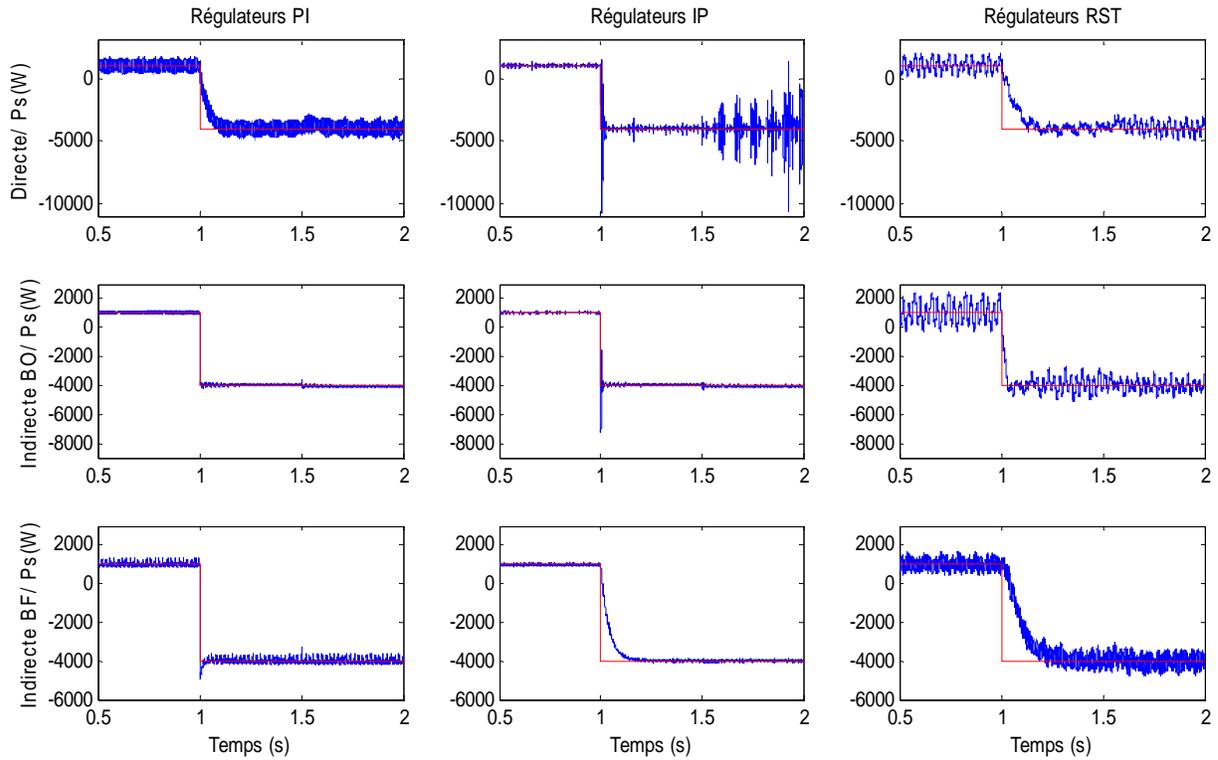


Figure 3.17 – Puissances actives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 50%).

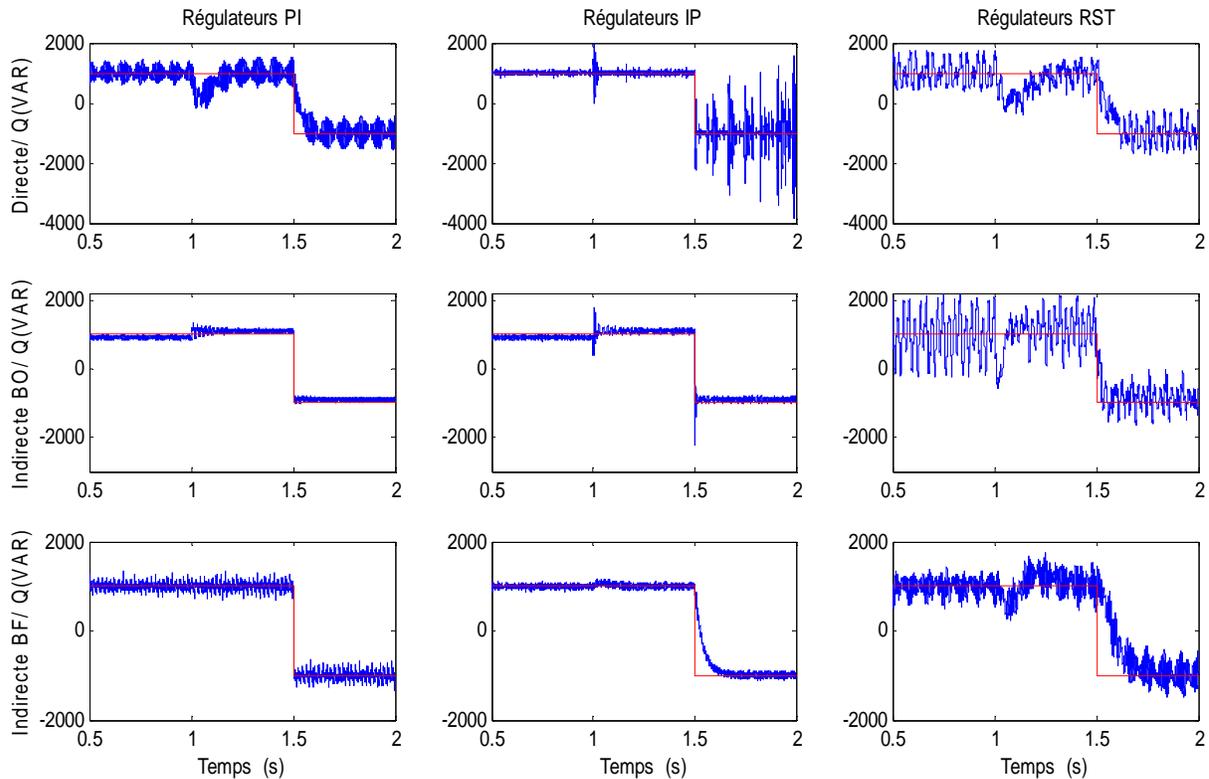


Figure 3.18 – Puissances réactives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 50%).

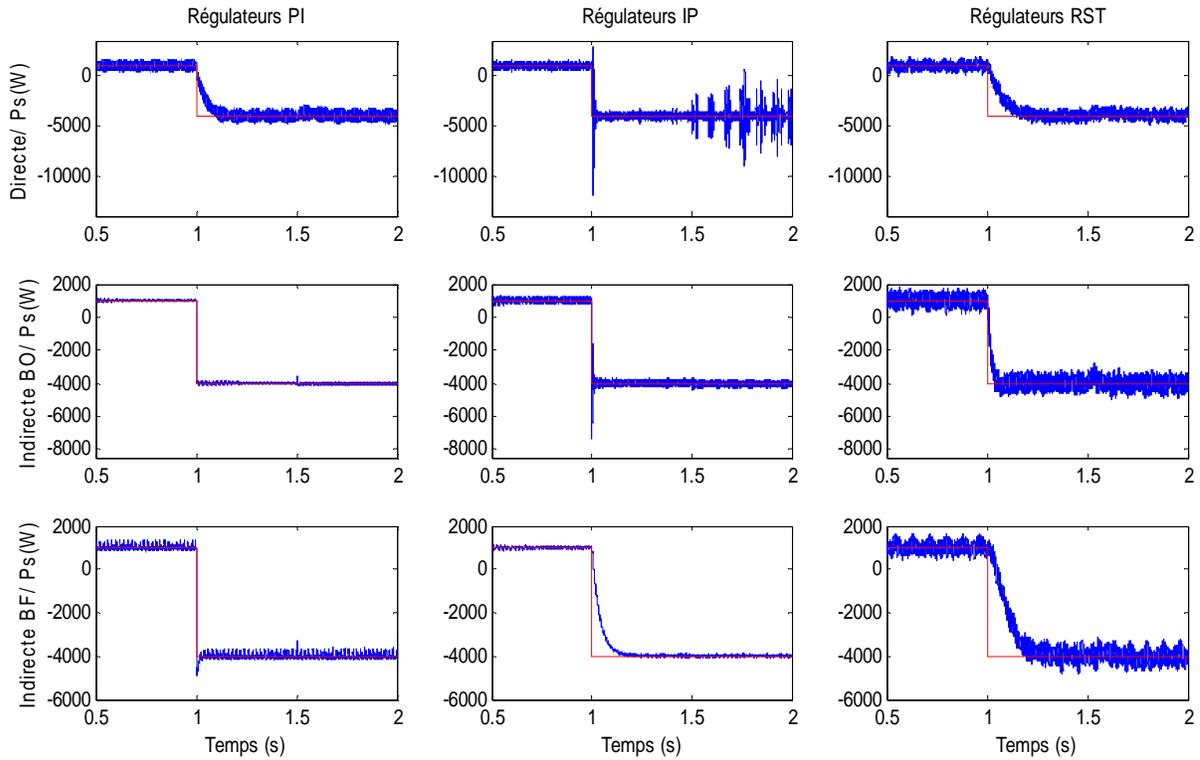


Figure 3.19 – Puissances actives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance rotorique de 50%).

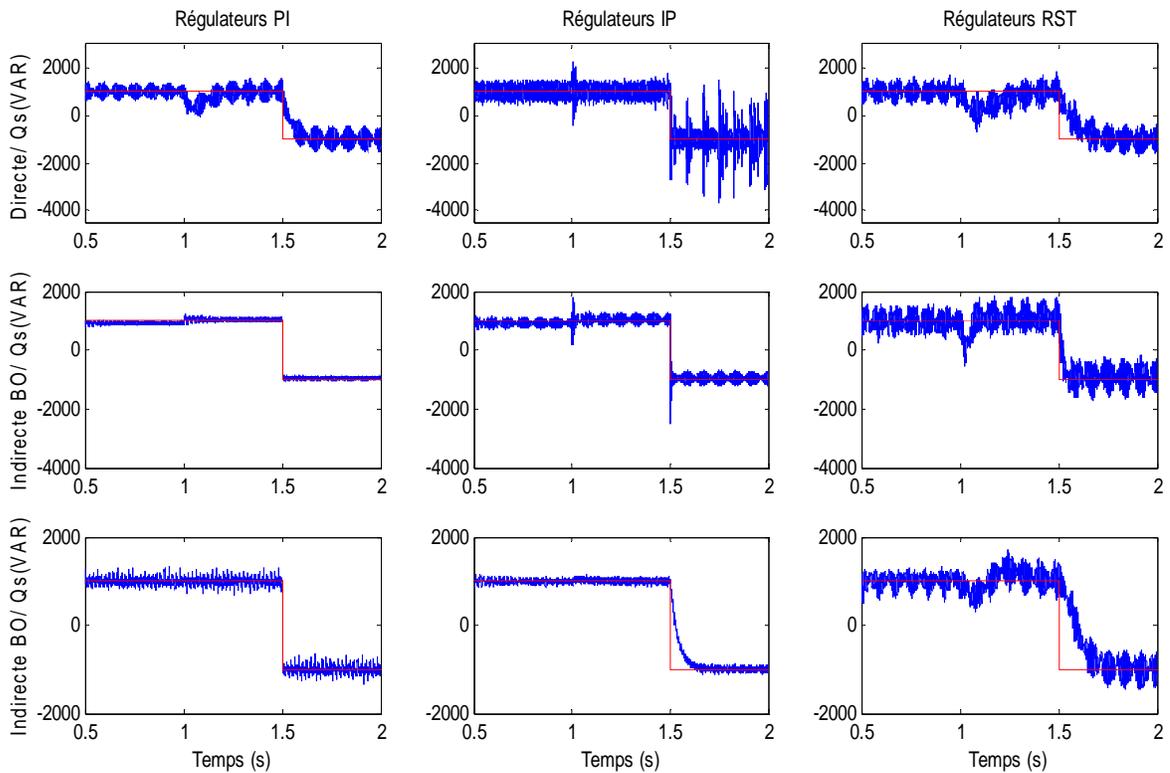


Figure 3.20 – Puissances réactives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance rotorique de 50%).

Dans le cas de la variation des inductances (Figures 3.21 et 3.22), une erreur statique apparaît dans le suivi de consignes de la puissance réactive lors de l'utilisation de la commande indirecte en boucle de puissance ouverte. Celle-ci est due au changement des inductances qui fausse l'estimation du courant rotorique à partir des puissances de référence. Cette erreur apparaît dans l'énergie réactive et non dans l'énergie active en raison du changement avec la même proportion de l'inductance cyclique mutuelle et de l'inductance cyclique statorique.

Ce changement garde le rapport  $(\frac{L_s}{MV_s})$  constant et par conséquent n'a pas d'influence sur le résultat de la relation (2.27) qui estime Iqr à partir de Pref. Si le changement n'avait pas été réalisé avec la même proportion, le rapport  $(\frac{L_s}{MV_s})$  aurait été modifié et donc l'estimation de Iqr aurait été faussée.

Il est bon à noter qu'en raison des relations qui lient les différentes inductances, il a été nécessaire de procéder à leur diminution de manière identique.

Pour palier au phénomène de l'apparition de l'erreur statique avec la variation des inductances, le bouclage de la puissance s'avère une solution robuste et efficace. La commande directe offre aussi une robustesse avérée, cependant elle possède des inconvénients tels que la fragilité devant les perturbations et le couplage très visible entre les axes directs et quadrature qui la marginalisent au profit de la commande indirecte.

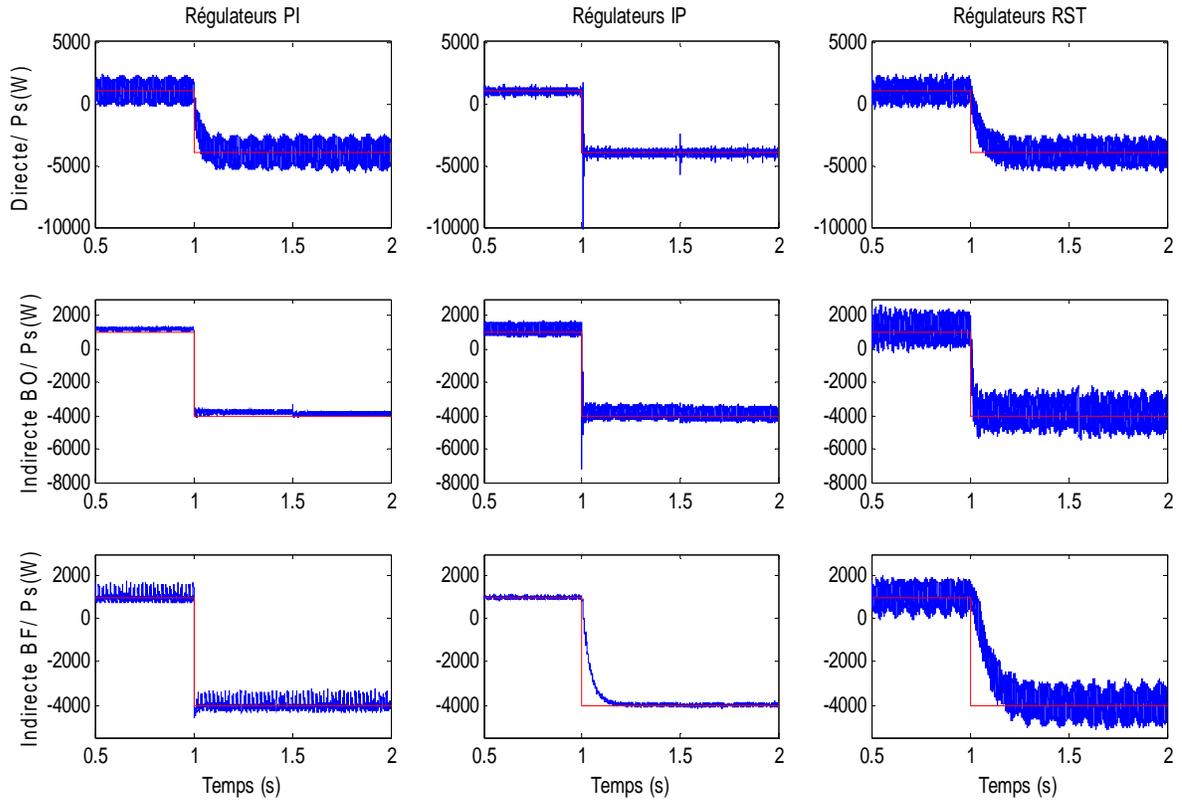


Figure 3.21 – Puissances actives statoriques (Teste de robustesse avec diminution des inductances de 50%).

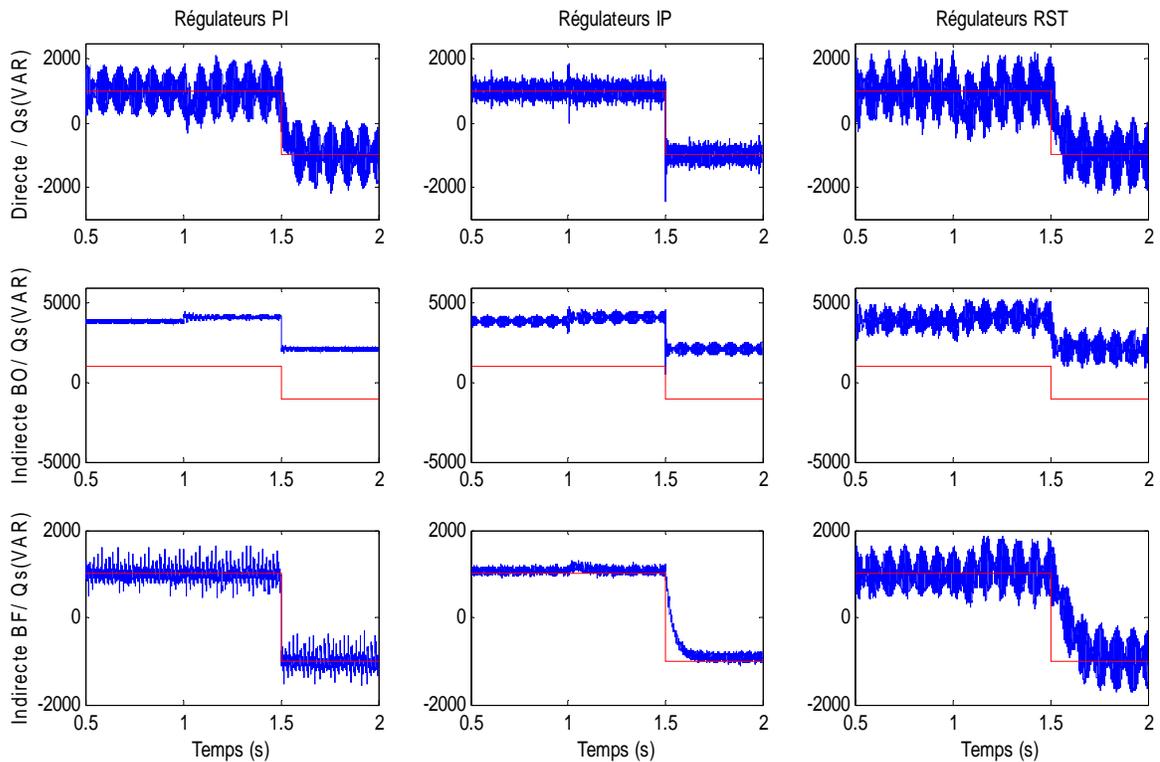


Figure 3.22 – Puissances réactives statoriques (Teste de robustesse avec diminution des inductances de 50%).

## 4. Conclusion

Lors de ce chapitre il a été établi la synthèse de trois régulateurs pour la commande de la MADA. Le but de ces régulateurs est de contrôler l'échange de puissances actives et réactives entre le stator de la machine et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotorique. Ces régulateurs ont été placés dans les trois modes de contrôles élaborés dans le deuxième chapitre.

Bien que le mode direct offre une simplicité de mise en œuvre avec des résultats convenables, le mode indirect justifie sa supériorité par la possibilité de contrôler les courants et de les limiter afin de protéger le bobinage rotorique de la machine.

C'est pourquoi, ce mode sera retenu pour la suite de nos travaux. Le régulateur IP étant le plus adapté en terme de performance et de simplicité de réalisation. Il va être choisi pour commander l'éolienne qui est constituée d'une MADA, d'une cascade redresseur -bus continu- onduleur et d'une turbine.

En outre, il convient de souligner qu'après analyse des essais précédemment effectués, il a été constaté que le dispositif étudié ne se limite pas à un fonctionnement générateur. Ceci s'explique par une puissance mesurée qui peut être positive ou négative. Par ailleurs, il est à remarquer que le dispositif peut fonctionner également en hypo et en hyper synchronisme. Ces deux raisons nous permettent de dire que la MADA fonctionne dans les quatre quadrants du couple et de la vitesse de manière convaincante.

Enfin, il est à noter que la MADA est capable de fournir de l'énergie réactive et donc de compenser le déficit du réseau de cette même énergie.

## Chapitre 4

# Modélisation et stratégie de commande de la cascade Onduleur -Bus continu - Redresseur

---

### 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'étude comprenait une alimentation parfaitement constante de l'onduleur, et donc l'incidence du rotor sur le réseau n'était pas traitée. Toutefois, celle du stator a été largement étudiée par la commande de l'énergie réactive statorique.

Dans ce chapitre, nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension. Ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et la limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI à hystérésis. L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau.

Il est à noter que le redresseur ne peut être connecté directement au réseau car la tension de ce dernier ne permet pas d'atteindre la tension de fonctionnement du bus continu. Pour cette raison un transformateur sera utilisé. De plus un filtre fera la liaison entre le redresseur et le transformateur pour limiter les harmoniques d'ordre supérieur et ainsi diminuer les pertes fer dans la MADA et le transformateur.

## 2. Description du montage

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue. Ceci est assuré par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La cascade (Figure 4.1) ainsi formée comporte deux convertisseurs à MLI. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations [16].

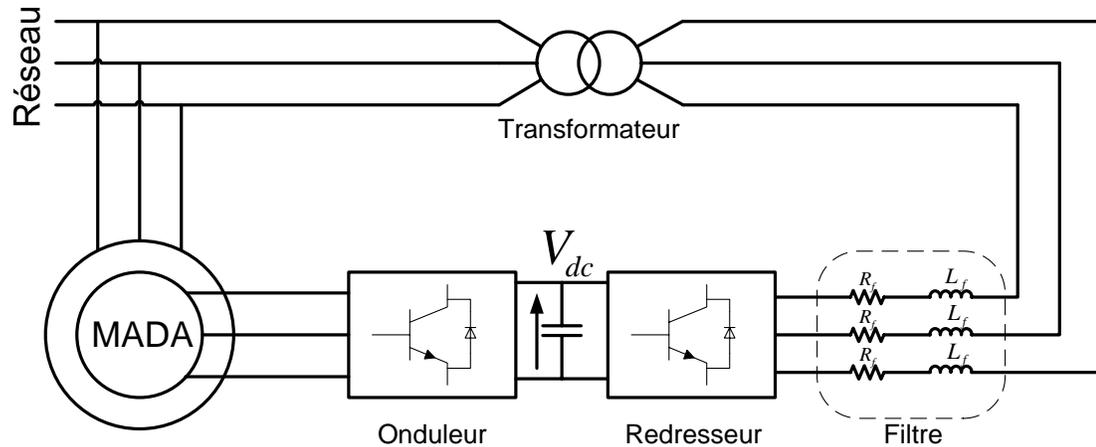


Figure 4.1 – Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux. Commandés par MLI, ils sont bidirectionnels en puissance donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment. Néanmoins les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Il est à noter que le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. Sa tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée, d'où la nécessité d'avoir une tension du bus continu supérieure à la valeur crête des tensions composées du réseau [17].

Après avoir repousser les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au

redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

### 3. Onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur d'énergie permettant d'onduler la tension du bus continu et la fournir au bobinage du rotor. La tension continue est considérée constante, elle est égale à 800V. Cette hypothèse nous permet de faciliter la commande du convertisseur. Ainsi la bidirectionnalité de la puissance entre le rotor et le réseau est possible à travers un niveau de tension du bus continu supérieur à la valeur crête de la tension ondulée [18]. Toujours par soucis de simplification, l'onduleur utilisé est à deux niveaux (Figure 4.2) car dans le cadre de cette étude nous avons pour but essentiellement de vérifier la faisabilité d'un système tel que décrit précédemment. L'atteinte de meilleures performances fera l'objet d'une autre étude par l'utilisation de convertisseurs multi niveaux. Ceux-ci amélioreront la qualité des tensions ondulées par la diminution des harmoniques.

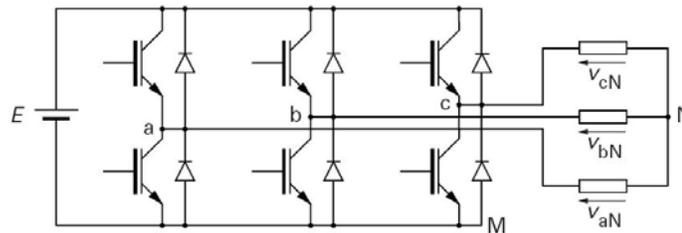


Figure 4.2 – Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT.

#### 3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modéliser chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel «  $S_i$  ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure 4.3).

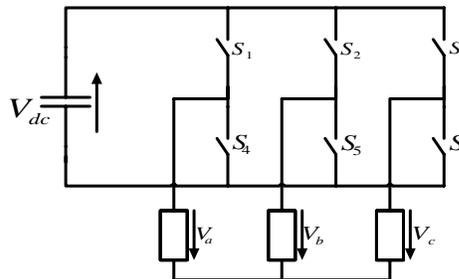


Figure 4.3 – Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables  $S_a, S_b$  et  $S_c$  se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :  
 $S_a=0$  Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;  
 $S_a=1$  Si S1 est fermé et S4 est ouvert.
- Branche2 :  
 $S_b=0$  Si S2 est ouvert et S5 est fermé ;  
 $S_b=1$  Si S2 est fermé et S5 est ouvert.
- Branche3 :  
 $S_c=0$  Si S3 est ouvert et S6 est fermé ;  
 $S_c=1$  Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (4.1)$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3} \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3} \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (4.2)$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

### 3.2. Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure 4.4).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur la fréquence de la tension de référence  $f$  :

$$m = \frac{f_p}{f} \tag{4.4}$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_{ref}$ ) et celle de la porteuse ( $U_p$ ) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \tag{4.5}$$

### 3.2.1. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [16]:

- ❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \tag{4.6}$$

Tel que  $V_c$  est la tension du bus continue.

- ❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \tag{4.7}$$

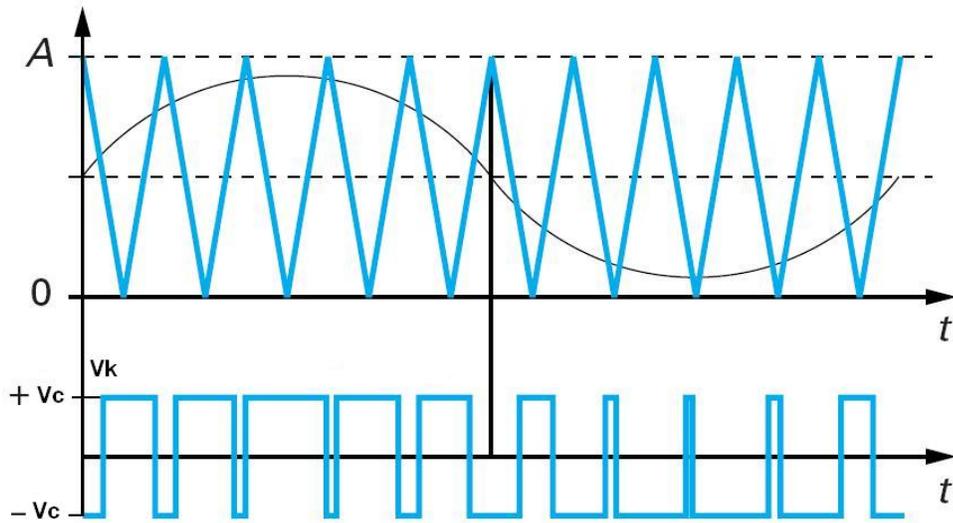


Figure 4.4 – Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse.

Nous pouvons ainsi, grâce à cette commande, avoir un système de tension équilibré direct ou inverse. L'algorithme précédent nous servira à simuler l'onduleur de tension à deux

niveaux et nous permettra d'étudier l'effet de ce dernier sur le fonctionnement de la MADA connectée à la cascade.

## 4. Redresseur de tension

Le redresseur a la même architecture que celle de l'onduleur précédemment établi. Son rôle est de fournir de la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI à hystérésis contrôle les courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler non seulement la puissance active mais aussi la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance du réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées.

### 4.1. Modélisation du redresseur

Le convertisseur étant à deux niveau donc identique à l'onduleur étudié précédemment, son modèle sera le même tel que :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_b \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

### 4.2. Commande du redresseur en courant par hystérésis

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence.

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant est le suivant :

- ❖ Si  $\varepsilon_k \geq \Delta I \Rightarrow S_k = 0$
- ❖ Si  $\varepsilon_k \leq -\Delta I \Rightarrow S_k = 1$

Avec  $\varepsilon_k$  est l'écart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase k, tel que :

$$\varepsilon_k = I_{res\_k} - I_{ref\_k}$$

Et  $\Delta I$  est la largeur de la bande d'hystérésis.

## 5. Filtre

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Dans le cadre de la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation.

Ainsi, pour procéder à la simulation, le passage à la modélisation se trouve indispensable.

### 5.1. Modélisation du filtre passif

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes direct et quadrature [15].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res\_d}(s)}{V_{res\_d} - V_{red\_d}} = \frac{I_{res\_q}(s)}{V_{res\_q} - V_{red\_q}} = \frac{1}{R_f + L_f S} \quad (4.10)$$

## 6. Régulation de la tension du bus continu

Après avoir modélisé les différents composants constituant la cascade, il devient plus aisé de la commander. Ainsi, un schéma synoptique de la chaîne de convertisseurs est établi. Celui-ci est régi par une régulation qui sera détaillée (Figure 4.5).

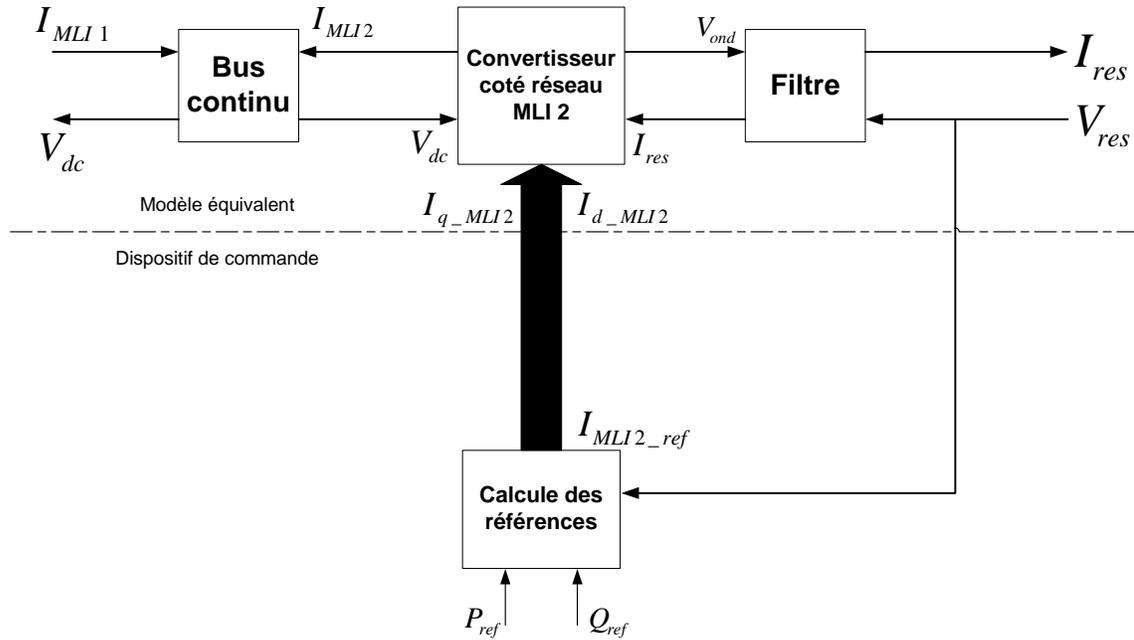


Figure 4.5 – Schéma synoptique de la commande du bus continu.

L'utilisation du redresseur a pour but d'assurer une tension continue constante quelles que soient les perturbations qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement. Pour cela, une boucle de régulation doit être effectuée. Celle-ci permet de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur. Aussi, afin de déterminer les signaux de commande du redresseur, il faut prendre en compte les puissances transitées qui sont fonction des courants du réseau alimentant le convertisseur :

$$\begin{cases} P = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (4.11)$$

A partir de ces relations il devient aisé de réguler les courants du coté réseau en imposant des références sur les puissances actives et réactives ( $P_{ref}, Q_{ref}$ ) :

$$\begin{cases} i_{dr\_ref} = \frac{P_{ref} v_{dr\_mes} + Q_{ref} v_{qr\_mes}}{v_{dr\_mes}^2 + v_{qr\_mes}^2} \\ i_{qr\_ref} = \frac{P_{ref} v_{qr\_mes} - Q_{ref} v_{dr\_mes}}{v_{dr\_mes}^2 + v_{qr\_mes}^2} \end{cases} \quad (4.12)$$

La composante du courant en quadrature est utilisée pour réguler la tension du bus continu, la composante directe, quand à elle, est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [13]. La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Il est à relever que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe tandis que les courants transités seront réglés par une boucle interne intégrée dans la

commande du redresseur commandé par hystérésis. Cette solution est la plus adaptée pour la commande des courants à la sortie d'un convertisseur électronique [19].

Le redresseur sera commandé par deux grandeurs. La puissance réactive de référence sera fixée à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau. La puissance active sera estimée à partir de la valeur référence du bus continu. L'estimation de la valeur référence de la puissance active passe par la connaissance du bilan énergétique de la cascade et donc une modélisation des transits de puissance active.

Pour pouvoir faire une modélisation du transit dans la liaison avec le réseau, il est impératif d'effectuer le bilan énergétique de cette dite liaison. En supposant que les pertes dans les convertisseurs et le condensateur sont nulles, la puissance transmise au redresseur s'exprime par:

$$P_{MLI2} = P_{MLI1} - P_c \quad (4.13)$$

$P_c$  Est la puissance emmagasinée dans le condensateur, elle s'exprime par :

$$P_c = V_{dc} \cdot I_c \quad (4.14)$$

La puissance fournie par l'onduleur connecté à la MADA s'exprime par :

$$P_{MLI1} = V_{dc} \cdot I_{MLI1} \quad (4.15)$$

La puissance transitée par le redresseur vers le réseau passe par un filtre, celui-ci contient une résistance et donc il dissipe par effet Joule la puissance qui y transite, d'où l'expression de la puissance renvoyée au réseau:

$$P = P_{MLI2} - P_{filtre} \quad (4.19)$$

Tel que :

$$P_{filtre} = R_{filtre} \cdot (I_{d\_res}^2 - I_{q\_res}^2) \quad (4.20)$$

Et donc la puissance renvoyée au réseau s'exprime par :

$$P = P_{MLI1} - P_c - P_{filtre} \quad (4.21)$$

A partir des relations (4.13, 4.14, 4.15, 4.17) cette puissance peut être écrite en fonction de la tension du bus continu tel que :

$$P = (I_{MLI1} - I_c) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (4.22)$$

Il est possible donc d'estimer la valeur de la puissance de référence établie à partir d'une valeur référence du courant dans le condensateur tel que :

$$P_{ref} = (I_{MLI1} - I_{c\_ref}) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (4.23)$$

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (Figure 4.6).

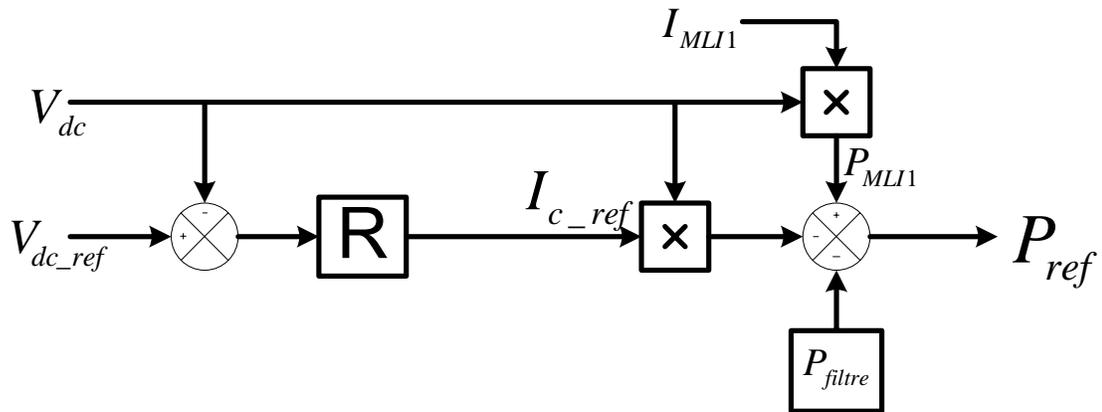


Figure 4.6 – Contrôle du bus continu.

## 7. Simulation et interprétations

La tension du bus continu dépend du courant dans le condensateur. En contrôlant ce dernier il devient possible de commander la valeur de la tension (Figure 4.7). Ainsi il est constaté que cette dernière suit sa référence dès que le condensateur est chargé. A travers le zoom du graphe de la tension  $V_{dc}$  (Figure 4.7), nous pouvons noter la faible incidence des échelons de puissances active et réactive sur son évolution. Quant à celle des puissances, nous pouvons remarquer qu'elle s'effectue dans de bonnes conditions (Figures 4.8 et 4.10). Il est cependant utile à noter que le suivi de consigne ne commence que lorsque la tension du bus atteint un niveau suffisant, d'où notre choix de fixer celui-ci à 800 V.

Le courant injecté par le redresseur est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau (Figure 4.9) Ainsi, la commande utilisée participe à la préservation de la qualité de ce dernier.

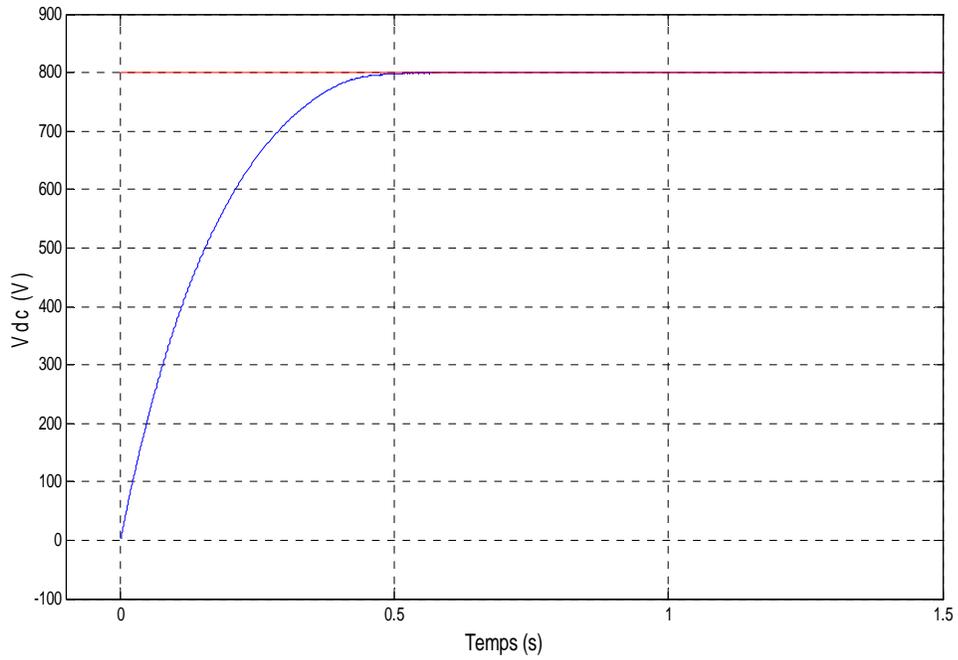


Figure 4.7 – Tension entre les bornes du condensateur ( $V_{dc}$ ) et sa référence (Teste avec  $P_s = -4000W$   $Q_s = 0VAR$  ).

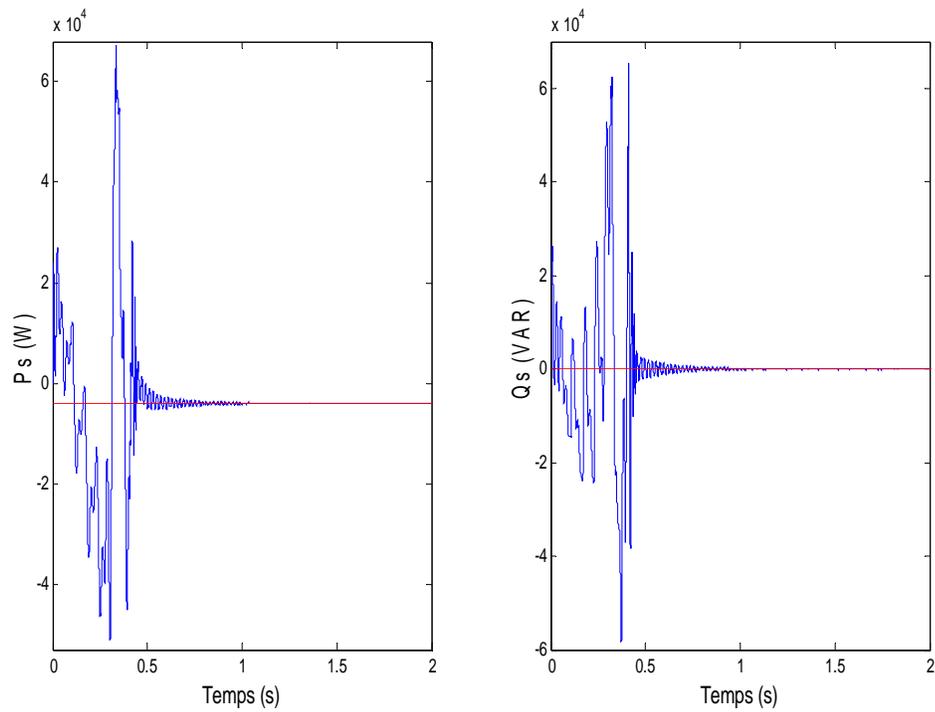


Figure 4.8 – Puissances active et réactive statorique et leurs références (Teste avec  $P_s = -4000W$   $Q_s = 0VAR$  ).

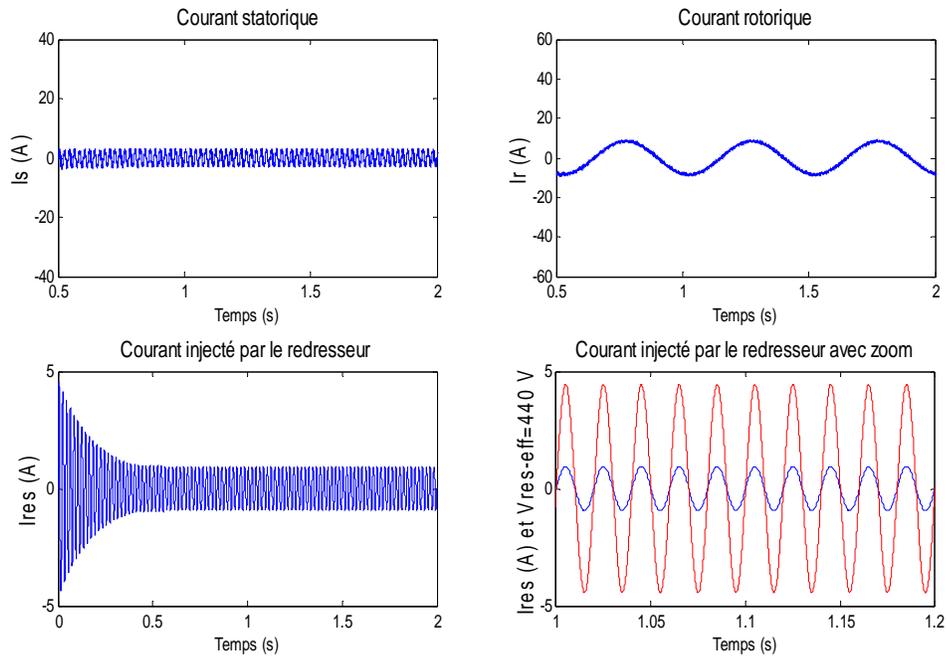


Figure 4.9 – Courants dans la MADA et courant injecté par le redresseur dans le réseau (Teste avec  $P_s = -4000W$   $Q_s = 0VAR$  ).

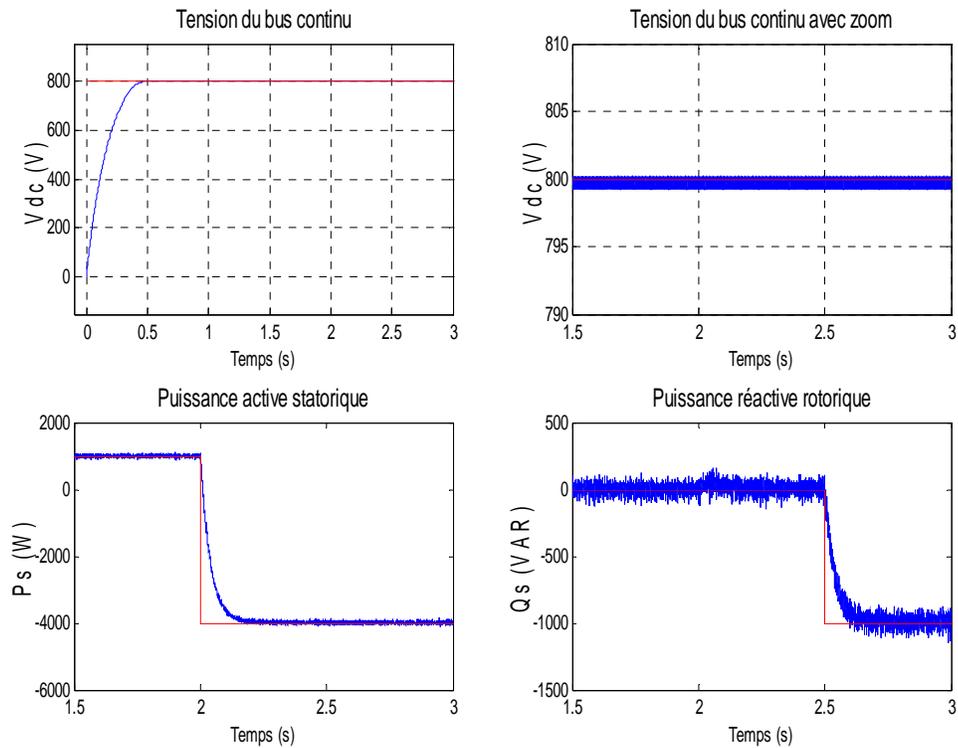


Figure 4.10 - Tension du bus continu et puissances active et réactive statoriques (essai avec des échelons de  $P_s$  et  $Q_s$ ).

## 8. Conclusion

Dans ce chapitre ont été étudiés les différents composants de la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. Il a été d'abord établi une étude sur l'onduleur alimentant le rotor. Celui-ci est à deux niveaux et commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion à une porteuse. Cet onduleur est lui-même alimenté par un bus continu dont la valeur de la tension est maintenue égale à 800 V grâce à un redresseur de tension. Ce dernier est commandé par une MLI à hystériser. Pour ne pas dégrader la qualité du réseau il faut y injecter un courant sinusoïdale en phase avec la tension. Ceci n'est possible qu'en imposant une référence adéquate à la commande à hystérésis. Cette référence doit prendre en compte le maintien de la tension du bus continu à la valeur voulue. Pour cela, une commande est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur et par la suite le courant à injecter dans le réseau.

De manière générale, il est constaté que le but de cette commande est atteint car la tension du bus continu se stabilise autour d'une valeur proche de celle de sa référence. La MADA suit les consignes des puissances actives et réactives. La préservation de la qualité du réseau est vérifiée à travers un courant injecté par la cascade qui est sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Il est ainsi possible de dire que cette commande est applicable dans un dispositif liant la MADA, la cascade (Redresseur, bus continu et onduleur) et la turbine éolienne. Cette étude sera effectuée dans le chapitre suivant en établissant une commande adaptée permettant d'avoir le meilleur rendement possible.

## Chapitre 5

# Asservissement d'une chaîne éolienne

---

## 1. Introduction

Dans les chapitres précédents il a été question de l'étude détaillée des différentes parties constituant une chaîne éolienne. Celles-ci ne peuvent pas fonctionner indépendamment et leurs utilités s'avèrent par la complémentarité qu'elles constituent.

Dans cette optique une commande régissant l'ensemble de la chaîne éolienne constituée de l'aérogénérateur, la MADA et de la cascade (Onduleur –Bus continu –Redresseur) sera réalisée. Elle se basera sur deux principes différents. Une comparaison en sera faite pour choisir la commande la plus adéquate.

Ainsi un émulateur éolien permettra de tester l'intégration d'une MADA couplée à un aérogénérateur.

## 2. Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

### 2.1. Reproduction de la vitesse du vent

La mesure exacte du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. [10]

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel est appliquée une fonction de transfert à déterminer [20]. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature de vent.

### 2.2. Modélisation du convertisseur éolien

La turbine étudiée comprend trois pales identiques. Elles sont fixées à un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de rapport  $G$ . Le multiplicateur entraîne le générateur électrique à travers un arbre moteur.

En considérant que la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales d'où une égalité des forces d'entraînement, nous pouvons remplacer les pales par un même système mécanique. Celui-ci comprend la somme des caractéristiques mécaniques des trois pales.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes :

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre moteur.

#### 2.2.1. Modélisation de la turbine

L'étude dynamique précédemment établie dans le premier chapitre montre que pour une vitesse de vent « $V$ » traversant la turbine nous obtenons :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (5.1)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique, sa valeur dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne ( $\lambda$ ).

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 10 kW pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m [5]. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas, son évolution en fonction de  $\lambda$  est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p = 7.9563 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 10^{-3} \quad (5.2)$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure 5.1, il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ( $C_p=0.5483$ ) est atteint pour une valeur du rapport d'avance  $\lambda = 6.4$ . Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.

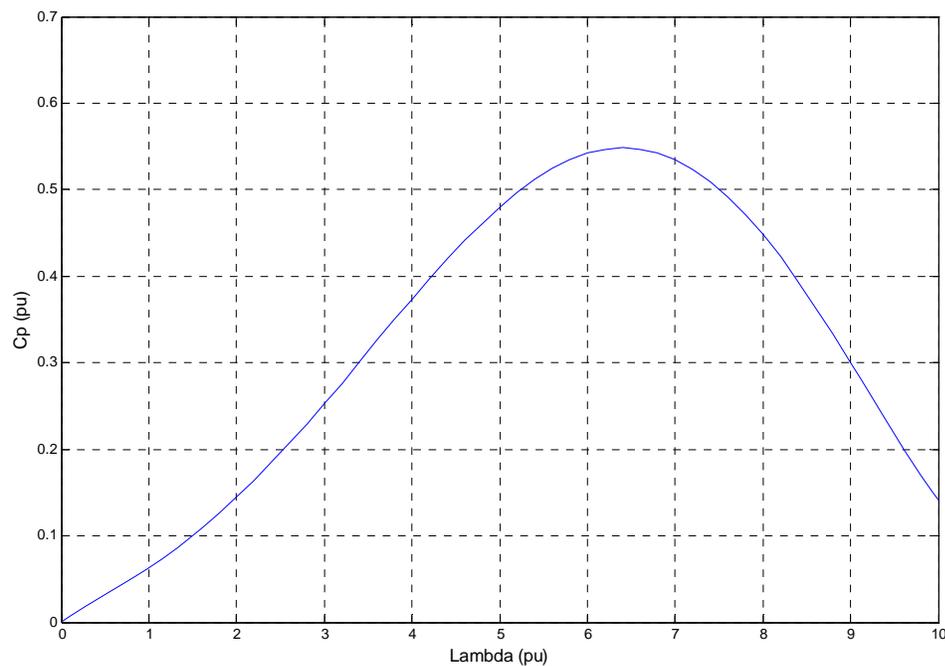


Figure 5.1 – Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Les expressions de la puissance et la vitesse étant connues, il est aisé ainsi de déduire l'expression du couple aérodynamique :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \quad (5.3)$$

### 2.2.2. Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (rapide). Il est mathématiquement modélisé par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (5.4)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (5.5)$$

### 2.2.3. Equation mécanique de l'arbre

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{mach} \quad (5.6)$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (5.7)$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (5.8)$$

### 2.2.4. Modèle global du convertisseur éolien

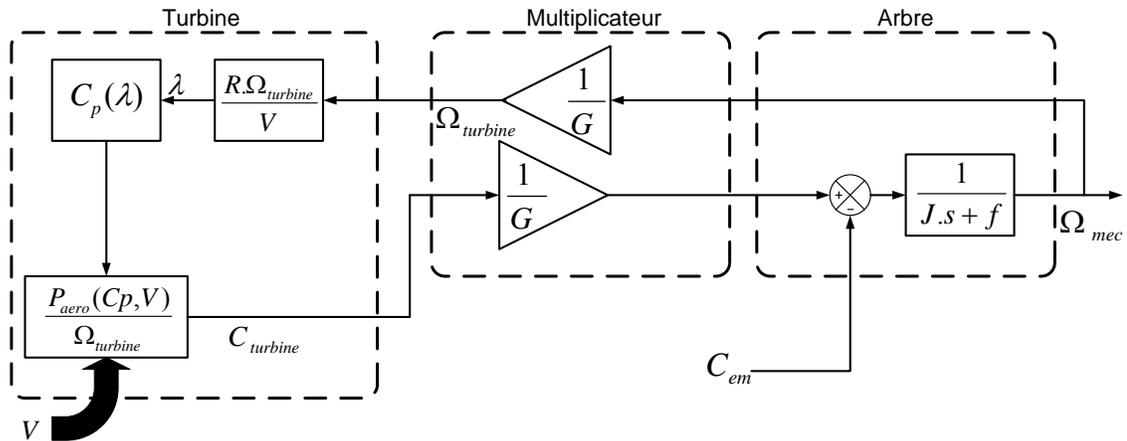


Figure 5.2 - Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure 5.2).

### 3. Technique d'extraction du maximum de puissance

#### 3.1. Optimisation de l'extraction de puissance

Le fonctionnement optimal de l'aérogénérateur est atteint pour un coefficient de puissance maximal, celui-ci atteint cette valeur pour  $\lambda = \lambda_{opt}$  (figure 5.1) d'où la vitesse de rotation résultante :

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \cdot V/R \quad (5.9)$$

La figure 5.9 montre la variation de  $\Omega_{opt}$  en fonction de la vitesse du vent. Suite à des considérations physiques et technologiques cette dernière se compose en 3 zones :

- Zone 1 : correspond aux vitesses de vent très faible, insuffisantes pour faire tourner la turbine.
- Zone 2 : Cette zone est linéaire correspondant à la relation (5.9). Un algorithme est ainsi utilisé pour l'extraction du maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking) et suivre la courbe de la figure (5.3).
- Zone 3 : Correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation est limitée à une valeur maximum afin d'éviter les dégâts.

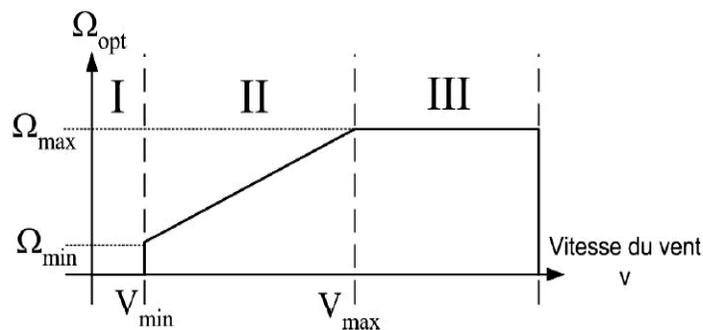


Figure 5.3 -Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

### 3.2. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite

Le but de la commande à vitesse variable de la MADA est d'extraire le maximum de puissance éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif étudié.

A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [13], [19] :

#### 3.2.1. Commande avec asservissement de la vitesse du vent

Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

D'après la relation (5.9) qui lie la vitesse mécanique à la vitesse du vent permettant d'avoir un  $C_p$  maximum, nous pouvons déterminer une structure ayant pour consigne une vitesse mécanique de référence établie à partir de la vitesse du vent.

Dans ce cas un régulateur est utilisé, ayant pour but d'égaliser la vitesse mécanique à la consigne qui est fonction de la vitesse du vent.

Nous pouvons ainsi établir un dispositif de commande simple liant la puissance électromagnétique convertie de la MADA à la vitesse du vent (Figure 5.4).

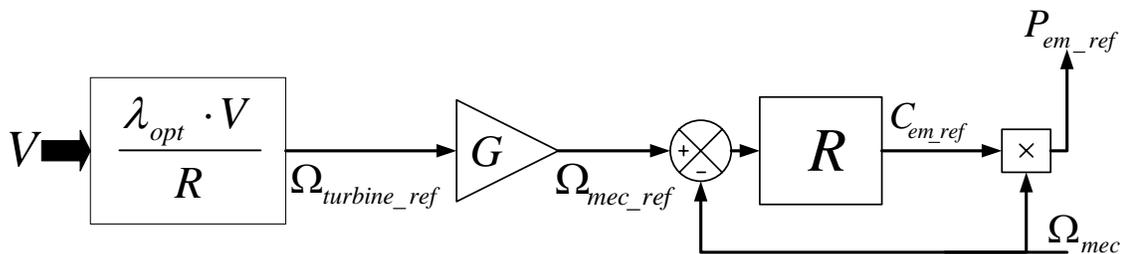


Figure 5.4 – Dispositif de commande avec asservissement de la vitesse.

#### 3.2.2. Commande sans asservissement de la vitesse du vent

Une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser pour deux raisons :

- L'anémomètre étant situé derrière la turbine, les perturbations à ce niveau de la nacelle causent des erreurs de lecture de la vitesse du vent.
- Etant donné le grand diamètre de la surface balayée par les pales (70 m pour les éoliennes de 1.5 Mw), l'utilisation d'un seul anémomètre conduit à n'utiliser

qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une fausse mesure de la vitesse conduit donc à imposer une consigne non adaptée d'où une dégradation de la puissance captée.

Pour établir cette structure de commande, il est nécessaire d'émettre l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (5.10)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} \cong 0$ ), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (5.11)$$

Le couple électromagnétique de référence est donc estimé à partir du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (5.12)$$

Le couple éolien lui même peut être estimé à partir de la vitesse du vent et de la vitesse de la turbine (5.13) :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \cdot V_{estimé}^3 \quad (5.13)$$

L'estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine-estimé}$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (5.14)$$

La mesure de la vitesse du vent étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (5.15)$$

On obtient donc une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (5.16)$$

Pour extraire le maximum de puissance générée, il faut fixer le rapport d'avance à  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\_max}$ . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p\_max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (5.17)$$

A partir de la valeur référence du couple électromagnétique, il est aisé de déterminer la valeur de la puissance électromagnétique de réglage :

$$P_{em-ref} = C_{em-ref} \cdot \Omega_{mec} = \frac{C_{p\_max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^3}{G^3} \quad (5.18)$$

Il est à noter que l'expression de la puissance électromagnétique de référence est proportionnelle au cube de la vitesse de génératrice.

La représentation sous forme de schéma blocs du dispositif de commande est illustrée dans la figure (5.5).

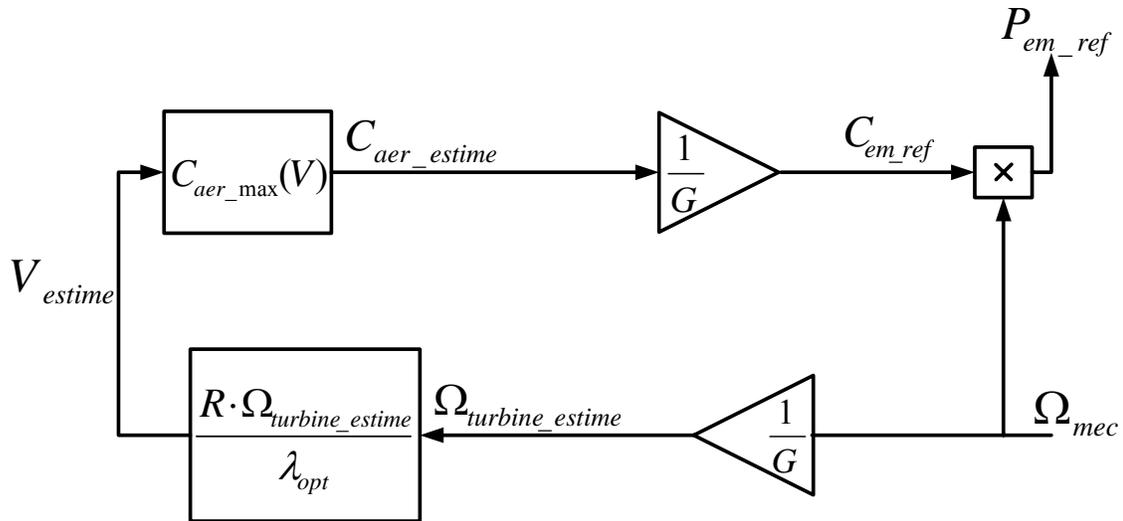


Figure 5.4 – Dispositif de commande sans asservissement de la vitesse.

## 4. Simulation et interprétation

Dans la section précédente, il a été établi des commandes adaptées à la MADA pour la production de l'énergie éolienne. Celles-ci se différencient par l'asservissement ou non de la vitesse du vent. En raison des qualités que présente la deuxième configuration nous avons choisi d'opter pour ce type de commande dans la suite de nos travaux.

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. Afin de mieux voir l'évolution des grandeurs mécanique et électrique lors de la génération de l'énergie éolienne. La MADA a été alimentée par un onduleur parfait au niveau du rotor. Cet essai a été réalisé en plus de celui utilisant l'alimentation étudiée dans le quatrième chapitre

A travers l'évolution du coefficient de puissance (Figures 5.6 et 5.8), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique.

Cependant, il est à noter qu'il diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. Ceci est dû à la non prise en compte des frottements visqueux dans l'estimation de la valeur de la puissance électromagnétique de référence. Néanmoins, cette erreur d'estimation ne dégrade pas considérablement le rendement de la turbine.

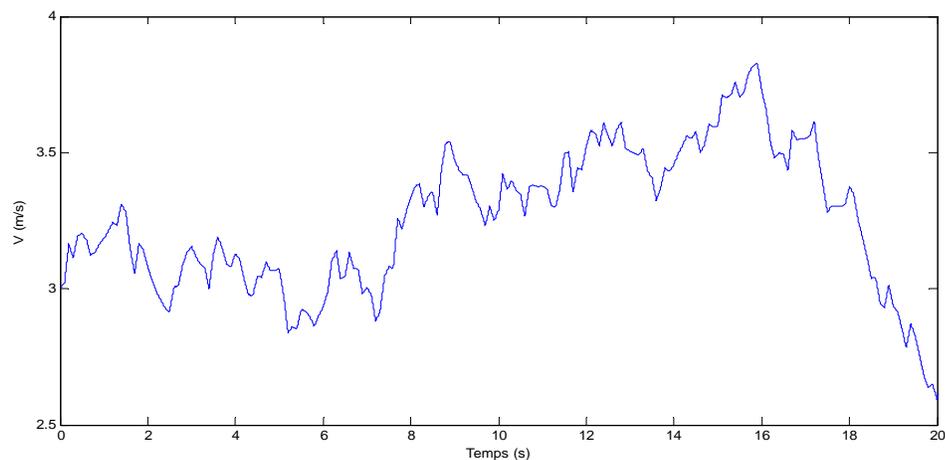


Figure 5.5 – Vitesse du vent en fonction du temps.

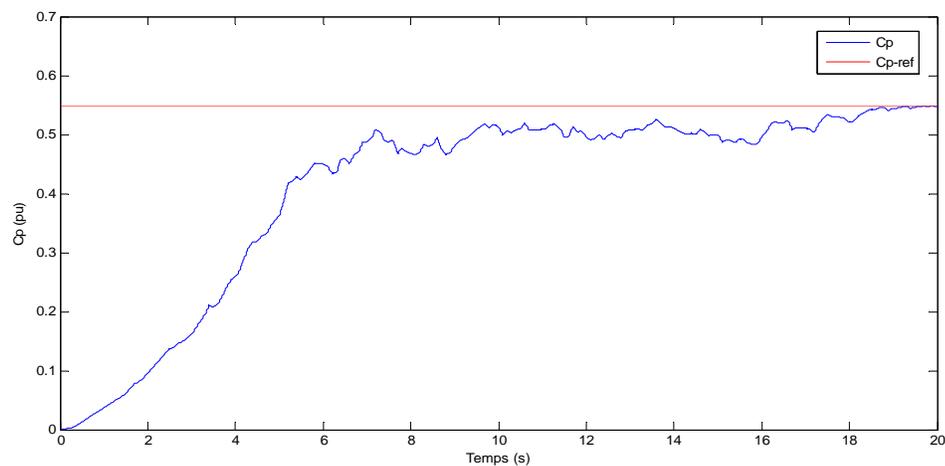
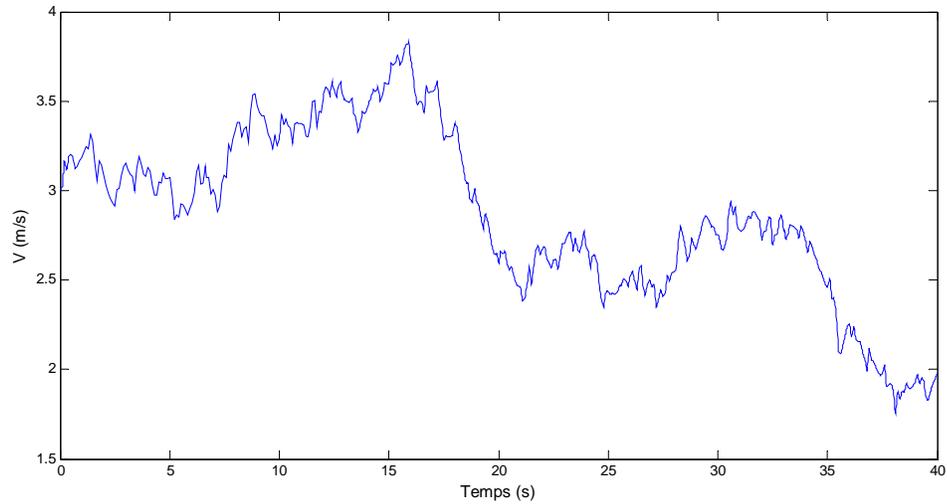


Figure 5.6 – Coefficient de puissance de la turbine éolienne et sa référence.



. Figure 5.7 – Vitesse du vent en fonction du temps (Essai avec un onduleur parfait).

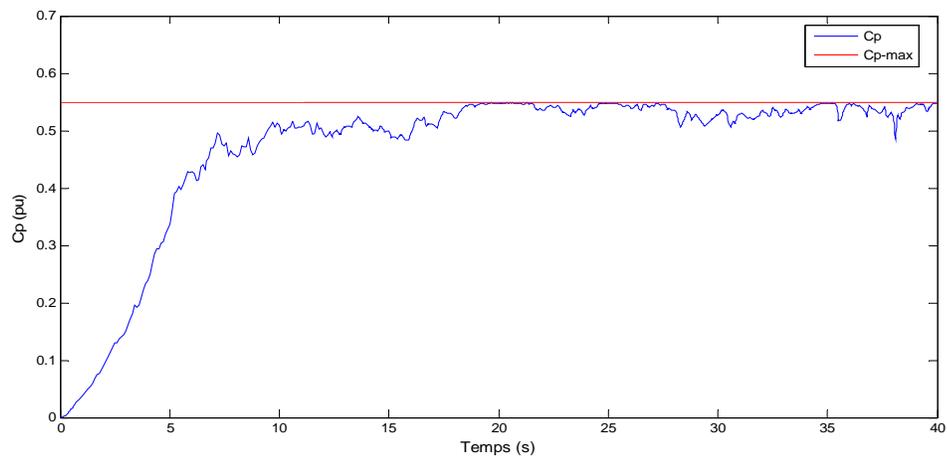


Figure 5.8 – Coefficient de puissance de la turbine éolienne (Essai avec un onduleur).

De même que pour le coefficient de puissance, le facteur d'avance (Figures 5.9 et 5.10) reste proche de sa valeur optimale. L'écart observé par rapport à cette dernière pour des vitesses élevées du vent est dû au même phénomène que pour le coefficient de puissance.

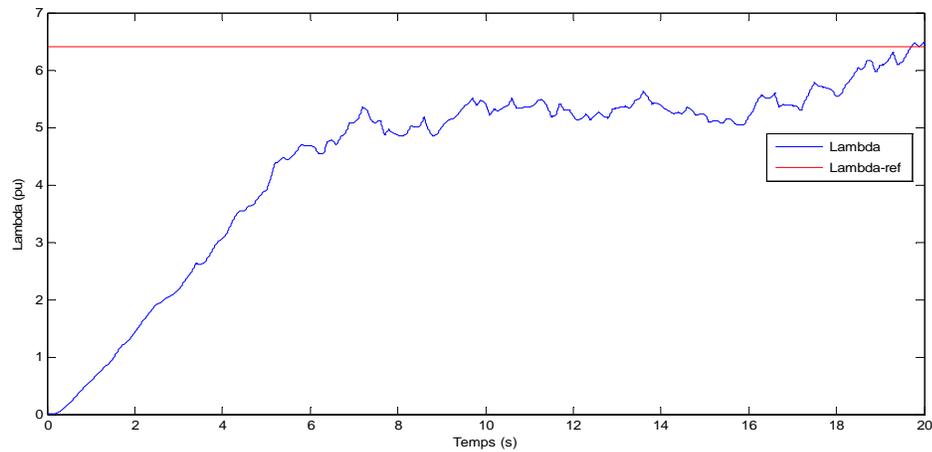


Figure 5.9 – Vitesse relative de l'éolienne et sa référence.

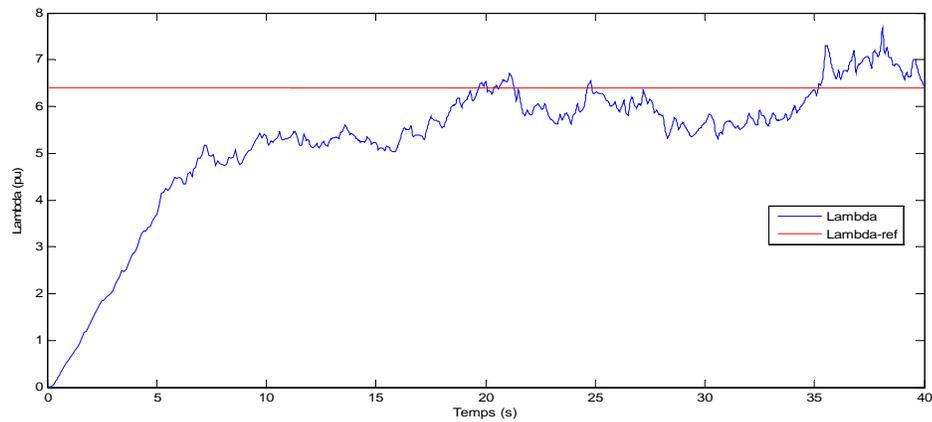


Figure 5.10– Vitesse relative de la turbine (Essai avec un onduleur parfait)

En ce qui concerne la MADA, celle-ci suit la référence de puissance active (Figures 5.11 et 5.13). Ses performances restent convenables avec le changement de la vitesse de rotation. Toute l'erreur (Figures 5.12 et 5.14) entre la puissance mesurée et sa référence n'est pas nulle. Celle-ci devient plus importante lors des régimes transitoires avec la variation de la vitesse du vent. Ce phénomène est dû à l'inertie importante de la turbine qui empêche un suivi instantané de la consigne.

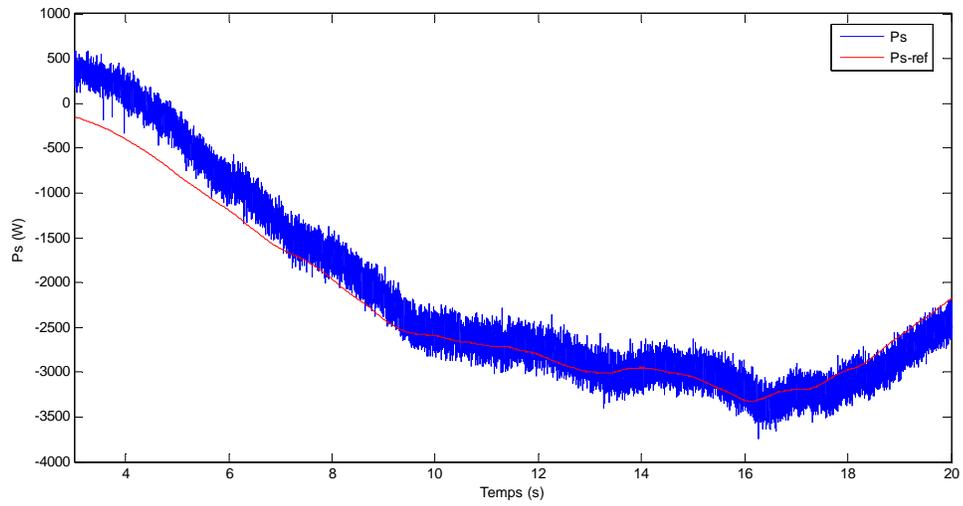


Figure 5.11 – Puissance active statorique et sa référence.

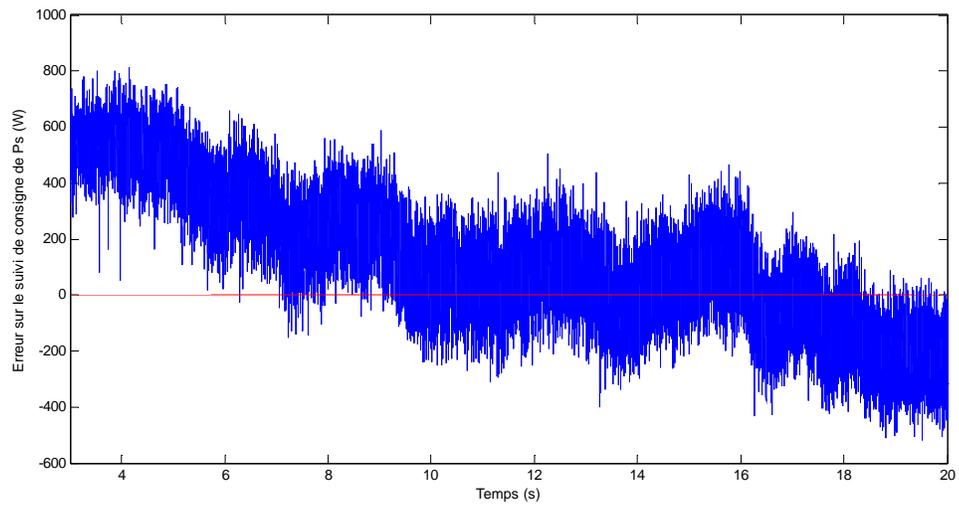


Figure 5.12 – Erreur sur le suivi de la consigne de la puissance statorique.

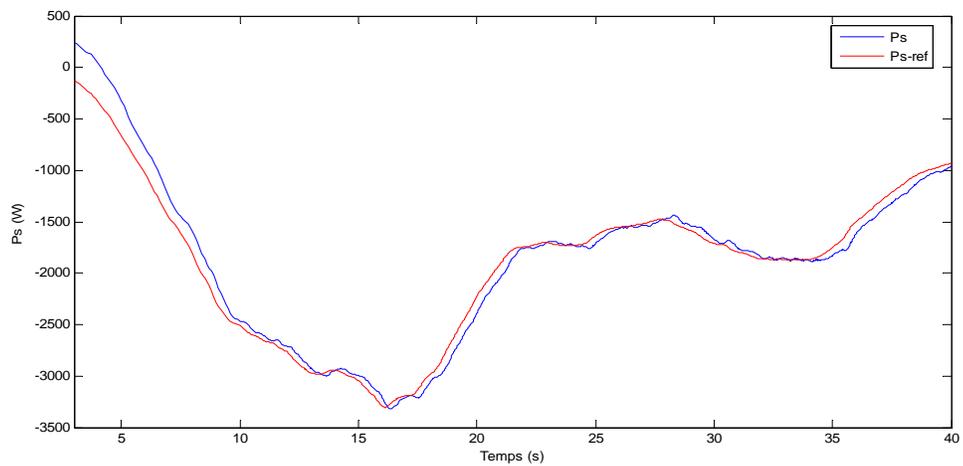


Figure 5.13– Puissance active statorique et sa référence (Essai avec un onduleur parfait).

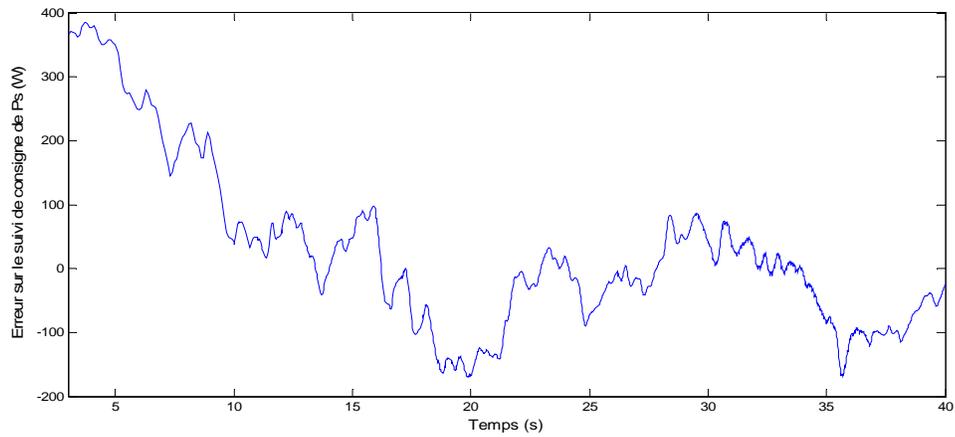


Figure 5.14 – Erreur sur le suivi de la consigne de la puissance statorique (Essai avec un onduleur parfait).

Quant à la puissance réactive (Figures 5.15 et 5.16), elle demeure proche du zéro qui à pour conséquence la faible incidence de la machine sur la qualité du réseau.

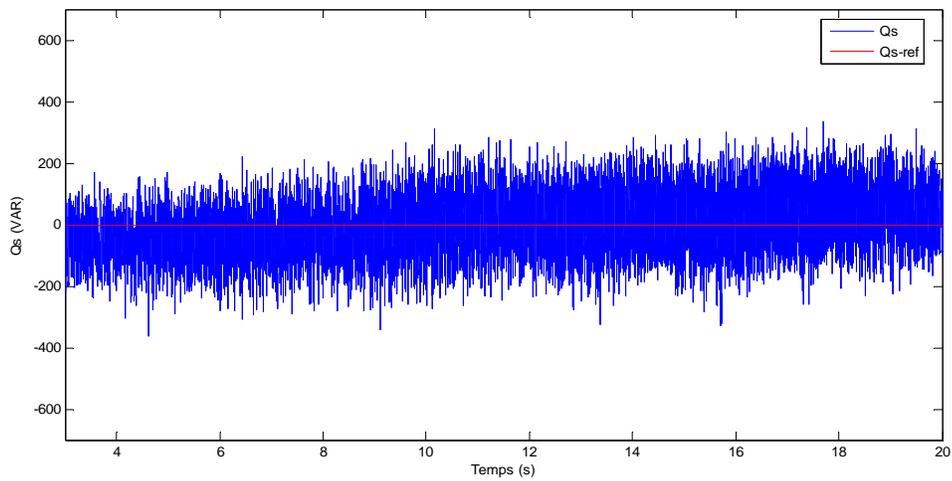


Figure 5.15 – Puissance réactive statorique et sa référence.

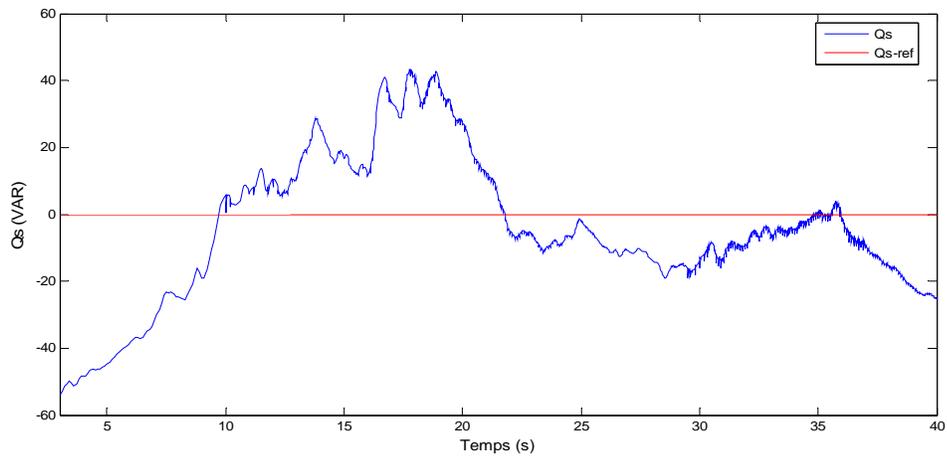


Figure 5.16 – Puissance réactive statorique et sa référence (Essai avec un onduleur parfait).

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine, il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptables (Figures 5.17 et 5.18). Car, mis à part la période de démarrage, la vitesse varie dans une plage comprise entre 0.8 et 1.2 de la vitesse du synchronisme. Ce constat vient en accord avec les contraintes technologiques qui limitent le glissement.

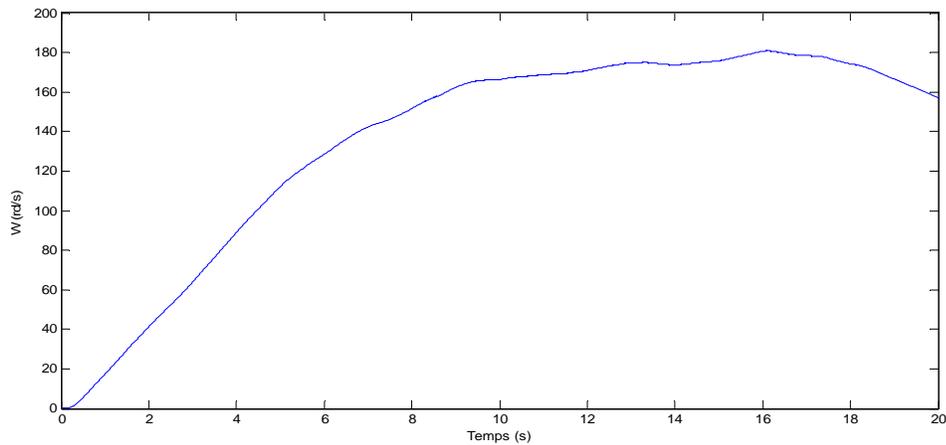


Figure 5.17 – Vitesse de rotation de la MADA.

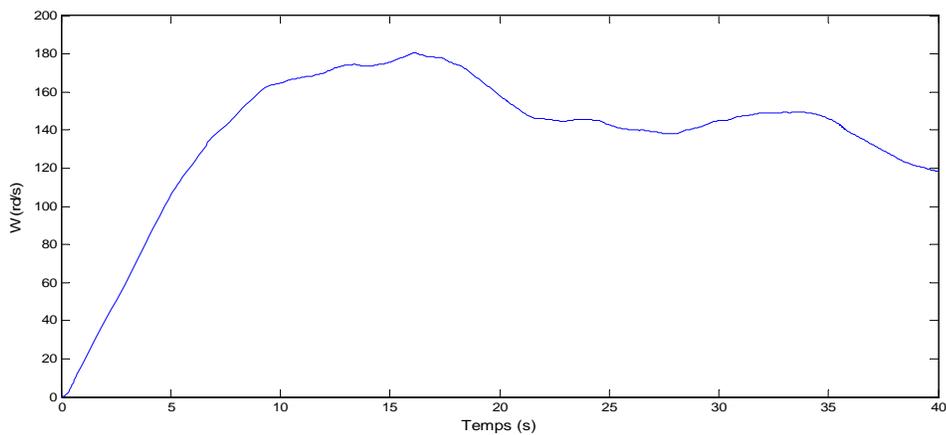


Figure 5.18 – Vitesse de rotation de la MADA (Essai avec un onduleur parfait).

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre il a été établi une modélisation des différents constituants de la turbine. Ceci nous a permis d'instaurer un modèle global composé de celui de l'aérogénérateur, de la liaison mécanique et de la MADA.

A partir de ce modèle, un émulateur éolien a été mis en œuvre. Il nous a permis de vérifier la capacité d'intégration de la MADA dans un système éolien. Nous avons pu donc obtenir des résultats probants.

Ainsi, nous avons constaté que la MADA est capable d'assurer, par son fonctionnement à vitesse variable, un rendement proche de celui du maximum théorique. Ceci a été observé à travers l'évolution du coefficient de puissance en fonction du temps.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Lors de cette étude nous avons modélisé un système global de génération d'électricité à partir d'énergie éolienne. Celle-ci a été suivie d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

- L'établissement d'un état de l'art relatif aux convertisseurs électromécaniques utilisant la MADA.
- L'étude aérodynamique donnant les bases théoriques justifiant le rôle de la MADA par son fonctionnement à la vitesse variable.
- L'établissement d'une stratégie de commande afin d'imposer des références de puissance actives et réactives, de permettre un fonctionnement à vitesse variable et de conforter ainsi notre problématique.

Plusieurs modes de contrôle ont été donc établis en vue de les comparer et d'en retenir le meilleur. Ceci a été fait avec l'intégration dans la comparaison de trois types de régulateurs. Ainsi, neuf structures de commande ont été réalisées, desquelles nous avons choisi la structure indirecte en boucle fermée de par sa robustesse et sa capacité à limiter les courants rotoriques donc à protéger le bobinage de la machine et le régulateur IP de par sa simplicité et de ses performances convenables.

- L'établissement de la cascade alimentant le rotor à partir du réseau. Celle-ci est composée d'un onduleur, d'un bus continu et d'un redresseur. Grâce à une commande adaptée nous avons pu imposer une référence sur la tension du bus continu mais aussi limiter les harmoniques injectées dans le réseau.

- La synthèse des travaux afin de mieux cerner le projet. Cette étape s'est intéressée à l'optimisation du rendement de la MADA dans un système éolien (MPPT). Deux types de commandes ont été élaborés. Ils reposent sur deux principes différents. L'un utilisant la vitesse du vent pour commander la MADA, l'autre estimant la valeur de la puissance active statorique de référence à partir de la vitesse mécanique de rotation de la machine. L'avantage que procure la deuxième méthode en terme de robustesse par rapport aux perturbations dues aux soudaines rafales de vent a été la raison de son choix lors de la simulation.

Nous avons pu noter alors, que la MADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Grâce à la commande en puissance active et réactive de la MADA, celle-ci devient un outil intéressant pour le gestionnaire du réseau. L'opérateur système est ainsi doté d'un dispositif qui lui est utile car ces puissances peuvent être positives ou négatives.

A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- L'intégration d'un système de stockage inertiel.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] A.MERICKI, *"Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance"*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] D.BENACHOUR, *El Watan*, 30 novembre 2006.
- [3] A. BOYETTE, *"Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne"*, thèse de doctorat, Université Henri, Nancy 1, 11 décembre 2006.
- [4] D.LE GOURIERE, *"Energie éolienne"*, éditions EYROLLES, pp 28-31.
- [5] F.POITIER, *"Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne"*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [6] L.KHETTACHE, *"Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation"*, mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [7] G. SEGUIER, *"Electrotechnique industrielle"*, éditions TEC & DOC, pp 513-514.
- [8] P.VIDAL, *"Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation"*, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 14 décembre 2004.
- [9] H.TAMRABET, *"Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone"*, mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [10] L.BAGHLI, *"Modélisation et commande de la machine asynchrone"*, notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [11] R.ACHOURI, M.HIDOUCHE, *"Commande vectorielle de la machine asynchrone"*, projet de fin d'étude, ENP, Juin 2007.

- [12] L.BAGHLI, "*Contribution à la commande de la machine asynchrone: utilisation de la logique flou, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques*", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy-1, France, 1999.
- [13] S. EL AIMANI, "*Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 6 décembre 2004.
- [14] M.A. KHELLAF, K.DOUBI, "*Commande vectorielle directe de la machine asynchrone double étoile alimentée en tension*", projet de fin d'études, USTHB, 28 juin 2004.
- [15] P.DE LARMINAT, "*Automatique, commande des systèmes linéaires*", Editions HERMES.
- [16] H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "*Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications*", Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [17] S.NOUI, "*Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à trois niveaux*", mémoire de magistère, Ecole Militaire Polytechnique, le 15/12/2004
- [18] M.ABBAS, M.MICHENTEL, "*Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux, application à l'énergie éolienne*", projet de fin d'études, ENP, Juin 2006.
- [19] F.MERRAH, "*Alimentation et commande d'une MADA (application à l'énergie éolienne)*", mémoire de magistère, ENP, 2007.
- [20] F.IOV, A.D.HANSEN, O.SORENSEN, F.BLAABJERG, "*Wind turbine blockset in MATLAB/Simulink*", Institute of energy technology, Alborg university, Denmark, Mars 2004.
- [21] I.HAMZAOUI, "*Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur*", mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.

# Annexes

# Annexe A

## Paramètres utilisés.

---

1. Valeurs nominales :

4 kW, 220/380 – 50 Hz, 15/8.6A, 1440 tr/min.

2. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique:  $R_s = 1.2 \quad \Omega.$
- Résistance rotorique:  $R_r = 1.8 \quad \Omega.$
- Inductance cyclique statorique:  $L_s = 0.1554 \quad H.$
- Inductance cyclique rotorique:  $L_r = 0.1568 \quad H.$
- Inductance cyclique mutuelle:  $L_m = 0.15 \quad H.$
- Le nombre de paires de pôles est:  $p = 2.$

3. Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie :  $J_{mach} = 0.2 \text{ kg.m}^2.$
- Coefficient de frottement visqueux :  $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd.}$

4. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales :  $R = 3\text{m.}$
- Gain du multiplicateur :  $G = 28.$
- Moment d'inertie de la turbine  $J_{turbine} = 315 \text{ kg.m}^2.$
- Coefficient de frottement visqueux :  $f = 0.0024 \text{ N.m.s/rd.}$

5. Paramètres du filtre :

- Résistance du filtre :  $R_f = 0.25\Omega .$
- Inductance du filtre :  $L_f = 0.005H .$

6. Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :

- $C = 4400 \mu\text{F.}$

# Annexe B

## Paramètres des régulateurs.

---

## 1. Régulation de la commande directe

IP	PI	RST
$K_p=36.57$ $K_i=5.7151 \cdot 10^5$	$K_p=0.6533$ $K_i=97.88$	$T=370860$ $S=p^2+67430p$ $R=4619p+T$

## 2. Régulation de la commande indirecte sans boucle de puissance

IP	PI	RST
$K_p=1.59$ $K_i=2.5077 \cdot 10^4$	$K_p=326.64$ $K_i=4894.5$	$T=3833893$ $S=p^2+14984p$ $R=22182p+T$

## 3. Régulation de la commande indirecte avec boucle de puissance

### Régulation de la boucle interne

IP	PI	RST
$K_p=1.59$ $K_i=2.5077 \cdot 10^4$	$K_p=0.033$ $K_i=0.0489$	$T=1318615$ $S=p^2+10484p$ $R=1121p+T$

### Régulation de la boucle externe

Avec le régulateurs IP	Avec le régulateurs PI	Avec le régulateurs RST
$K_p=10^4$ $K_i=10^6$	$\frac{p^2 + 49.10^3 p + 1225.10^6}{35.10^3 p^2 + 49.10^6 p + 35.10^6}$	$\frac{10}{p}$