

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Spécialité: Machines électriques

présenté par: **SEBSI Nacira**

Titre du mémoire

**COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE (GPC)  
D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE APPLIQUEE  
DANS UNE CHAINE EOLIENNE**

Proposé par Mrs: D. KOUCHIH

N. BOUMALHA

Année Universitaire 2016-2017

## Remerciements

---

Avant tout, je remercie DIEU le tout –puissant de m’ avoir donné le courage, la volonté, la patience, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur Mr. D.Kouchih et Mr. N.Boumalha qui m’ ont aidé pour rendre ce travail effectif.

Mes sincères remerciements sont aussi adressés aux membres du jury pour avoir accepté d’honorer par leur jugement mon travail.

J’ adresse également mes remerciements à tous les professeurs et les enseignants du département d’ Electronique.

Mes remerciements vont également à mes collègues, mes amis, et toute personne ayant aidé, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l’ aboutissement de ce travail.

Finalement, je remercie très chaleureusement ma famille. Merci pour l’ inestimable soutien moral et pour l’ encouragement que j’ ai toujours reçus malgré la distance. Et enfin, un dernier et grand merci à celui qui partage ma vie, à mon mari. Merci pour avoir été toujours à mes côtés, pour m’ avoir rendu heureuse, pour son soutien et sa patience pendant les moments difficiles. Merci infiniment!

# Dédicace

---

*A la mémoire de ma très chère mère :*

*Je dédie ce mémoire à mon père pour m'avoir soutenu le long de mes études.*

*Ce mémoire est également dédié à mon mari (tu vois, une thèse il y a bien une fin finalement) pour le soutien qu'il m'a apporté, sans oublier mon fils Hamza.*

*Je dédie aussi ce travail à toute ma famille.*

---

ملخص:

بعد عرض وجيز لمفاهيم و معادلات تيسير إشتغال نظام طاقة الرياح قمنا بدراسة للمولد اللاتزامني مزدوج التغذية مدمج في نظام طاقة الرياح لاشتغال خالي من العيوب, من أجل تحقيق أقصى قدر ممكن من الطاقة المنتجة.

مع تفصيل نمذجة هذا الأخير و تحكم شعاعي موجه من التدفق للجزء الثابت مع تحكم في مراقبة الاستطاعة الردية و تنظيم سرعة الدوران للمولد.

هذا التحكم وضع و اختبر بتركيب نوعين من المتحكمات الخطية تناسبية – تكاملي و GPC

كلمات المفاتيح:

المولد اللاتزامني مزدوج التغذية, المتحكم التنبؤي المعمم, تحكم شعاعي.

---

**Résumé :** Après un bref rappel des concepts et équations régissant le fonctionnement d'un système éolien.Ce document dresse une étude sur la stratégie de commande de la génératrice asynchrone à double alimentation(MADA)intégrée dans le système éolien pour un fonctionnement sain afin de maximiser la puissance produite ; la modélisation de cette dernière, et une commande vectorielle par orientation de flux statorique est mise en œuvre avec contrôle de puissance réactive statorique et réglage de la vitesse de rotation de la MADA.Cette commande est élaborée et testée en synthétisant des régulateurs de type PI et GPC.

**Mots clés :** Génératrice asynchrone à double alimentation ; GPC ; commande vectorielle.

---

**Abstract :**

After a short recall of the concepts and equations governing wind energy conversion systems,this document makes a state strategy for control of a doubly fed induction generator (DFIG) ,built in to the wind system, for healthy functioning in order to maximize the power product.A modeling of this last and its vector control is implemented with stator flux orientation with stator reactive power,control and ajsument of the rotational speed of DFIG.This control is elaborated and tested by synthesizing two different linear controllers Proportional Integral(PI) and GPC.

**Keywords :** DFIG;generalized predictive control;vector control.

---

## Listes des acronymes et abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
$V_1, V_2$	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
$\rho$	densité de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$
$s$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
$m$	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
$P_m$	Puissance extraite par le rotor éolien
$P_{mt}$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$C_{p-max}$	Coefficient de puissance de l'éolienne maximal de la turbine.
$\lambda$	Vitesse relative de l'éolienne
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale de l'éolienne
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur
$G$	Gain du multiplicateur
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_g$	Couple résistant issue du multiplicateur.
$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux
$R$	Rayon de la turbine
$f$	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
$J$	Inertie totale de l'arbre
$s, r$	Indices correspondants au stator et au rotor.
$a, b, c$	Indices correspondants aux trois phase a, b, c.
$d, q$	Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.
$L_s, L_r$	Inductances cycliques statorique et rotorique par phase.
$L_m$	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
$\Omega_r$	Vitesse de la MADA
$R_s, R_r$	Résistances d'enroulement statorique et rotorique par phase.
$\sigma$	Coefficient de dispersion
$p$	Nombre de paire de pôle.
$Cem$	Couple électromagnétique.
$Cr$	Couple résistant.
$\omega_s, \omega_r$	Pulsations électriques statorique et rotorique.
$S$	Opérateur de LAPLACE
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique du rotor.
$\varphi_s, \varphi_r$	Flux statorique, rotorique.
$P_s$	Puissance active statorique.
$Q_s$	Puissance réactive statorique.
$K_p$	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur
$K_i$	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
$g$	Le glissement

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<i>DFIG</i>	Doubly-fed induction generator
MADA	Machine Asynchrone à double alimentation
GPC	Generalized predictive control
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MLI	Modulation de largeur d' Impulsion
RST	Structure polynomiale

# Table des matières

Liste des figures  
Liste des tableaux  
Introduction générale

## Chapitre 1 DESCRIPTION D'UNE CHAÎNE ÉOLIENNE

Introduction	13
1.2 Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes	13
1.2.1 Principe	13
1.3 Éléments constitutifs d'une éolienne	14
1.3.1 La tour ou le mât	15
1.3.2 La nacelle	15
1.3.3 Le rotor	15
1.4 Différents types d'éoliennes	15
1.5 Phases de fonctionnement d'une éolienne	16
1.6 Principe de fonctionnement	17
1.6.1 Éoliennes à décrochages aérodynamiques	18
1.6.2 Éoliennes à pales orientables	19
1.7 Fonctionnement à vitesse fixe	19
1.8 Fonctionnement à vitesse variable	20
1.9 Éolienne à machine asynchrone à cage	21
1.10 Éolienne à machine asynchrone à double alimentation	22
1.11 Autres machines	22
1.12 Aérogénérateur étudié	23
1.13 Technique d'extraction du maximum de puissance	24
1.13.1 Optimisation de l'extraction de puissance	24
1.13.2 Algorithmes de maximisation de la puissance extraite	25
1.13.3 Commande avec asservissement de la vitesse	25
1.13.4 Commande sans asservissement de la vitesse	26
1.14 Conversion électromécanique	28
1.14.1 Utilisation de la MADA dans la conversion électromécanique	28
<b>Chapitre 2</b>	
<b>MODELISATION DE LA MADA</b>	
2.1 Première Section	30
2.1.1 Introduction	30
2.1.2 Caractéristiques du vent et des turbines : aspects aérodynamiques	30
2.2 Modélisation d'une turbine éolienne	33
2.2.1 La puissance d'une éolienne	33
2.2.2 La puissance aérodynamique	34

2.2.3	Modélisation du multiplicateur	34
2.2.4	Équation mécanique de l'arbre	35
2.2.5	Schéma bloc du modèle de la turbine	35
2.3	Modèle de la machine asynchrone à double alimentation « sain »	36
2.3.1	Modèle de la DFIG dans le plan « ABC »	37
2.4	Modélisation de l'onduleur de tension « côté rotor»	40
2.4.1	Stratégie de commande	42
2.4.2	Algorithme de commande	42
2.5	Conclusion	43
<b>Chapitre 3</b>		
<b>COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA</b>		
3.1	Introduction	44
3.2	Commande vectorielle de la MADA	44
3.3	Principe de la commande à flux orienté	45
3.3.1	Relations entre les courants statoriques et rotoriques	46
3.3.2	Expression des puissances active et réactive	46
3.3.3	Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques	47
3.3.4	Schéma synoptique du contrôle de la MADA	49
3.4	Dimensionnement de régulateur PI	51
3.4.1	Régulateurs PI de courants	51
3.4.2	Régulateur IP de la vitesse	52
3.4.3	Régulateur de la puissance réactive statorique $Q_s$	55
3.5	Résultats	56
3.6	Conclusion	64
<b>Chapitre 4</b>		
<b>COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE D'UNE MADA</b>		
4.1	Introduction	66
4.2	Principe de la commande prédictive	67
4.3	Principe de fonctionnement du commande prédictive généralisée	68
4.4	Formulation du modèle de prédiction	69
4.5	Structure du prédicteur optimal	70
4.5.1	Prédicteur optimal sous forme matricielle	71
4.5.2	Fonction de coût sous forme matricielle	72
4.5.3	Loi de commande optimale	72
4.5.4	Stratégie de l'horizon fuyant	72
4.6	Structure RST du régulateur	72
4.7	Algorithme de calcul de la GPC	74
4.8	Choix des paramètres de réglage	74
4.8.1	Choix de l'horizon minimal de prédiction $N1$	75
4.8.2	Choix de l'horizon maximal de prédiction $N2$	75
4.8.3	Choix de l'horizon maximal de prédiction $Nu$	75



4.8.4 Choix du facteur de pondération de la commande $\lambda$	75
4.9 Application numérique sur la DFIG	76
4.10 Synthèse du régulateur GPC pour la boucle de courant	76
4.11 Résultats de la simulation	77
4.12 Conclusion	85
Conclusion générale	86
ANNEXES	87
BIBLIOGRAPHIE	88

## Liste des figures.

<b>Figure 1.1.</b>	Principe de la conversion d'énergie	12
<b>Figure 1.2.</b>	Zone de fonctionnement et caractéristiques d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA	14
<b>Figure 1.3.</b>	Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique)	16
<b>Figure 1.4.</b>	Éolienne à vitesse fixe	17
<b>Figure 1.5.</b>	Éolienne à MAS piloté au stator	19
<b>Figure 1.6.</b>	Éolienne à MADA pilotée au rotor [16]	20
<b>Figure 1.7</b>	Evolution de la configuration électrique	21
<b>Figure 1.8</b>	Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	23
<b>Figure 1.9</b>	Dispositif de commande avec asservissement de la vitesse	24
<b>Figure 1.10</b>	Dispositif de commande sans asservissement de la vitesse	26
<b>Figure.1.11.</b>	Structure du rotor de la MADA	27
<b>Figure 2.1.</b>	Tube de courant autour d'une éolienne	29
<b>Figure 2.2.</b>	Coefficient de puissance	30
<b>Figure 2.3.</b>	Schéma de la turbine éolienne	31
<b>Figure. 2.4.</b>	Schéma bloc du modèle de la turbine	34
<b>Figure.2.5</b>	Représentation de la MADA dans le système triphasé	35
<b>Figure.2.6.</b>	Orientation du repère de park	37
<b>Figure.2.7.</b>	Onduleur triphasé à deux niveaux	39
<b>Figure.2.8.</b>	Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse	40
<b>Figure 3.1.</b>	Vecteurs tension et flux statoriques dans le système d'axe choisi	43
<b>Figure 3.2.</b>	Schéma synoptique du contrôle indirect de la puissance réactive et du réglage de vitesse de rotation de la DFIG	47
<b>Figure 3.3.</b>	Schéma bloc de réglage de puissance réactive	48
<b>Figure 3.4.</b>	Boucle de la régulation des courants rotoriques ( $I_{dr}I_{qr}$ )	49
<b>Figure 3.5.</b>	Boucle de régulation de la vitesse $\Omega$	51
<b>Figure 3.6.</b>	Boucle externe	51
<b>Figure 3.7.</b>	Boucle de régulation de la puissance réactive statorique $Q_s$	52
<b>Figure 4.1.</b>	Représentation temporelle du principe de la commande prédictive	57
<b>Figure 4.2.</b>	Représentation CARIMA du modèle numérique	58
<b>Figure 4.3</b>	Structure RST de la commande GPC	62

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b>	Classification des turbines éoliennes	14
---------------------	---------------------------------------	----

## Introduction générale

---

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et l'éolien, et leurs utilisations pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain.

Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle énergie durable. Le programme consiste à installer une puissance d'énergie renouvelable de près de 22000MW entre 2011 et 2030 dont 12000MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs [30].

Il y a lieu de signaler que l'intérêt qu'a donné le gouvernement algérien au secteur des énergies renouvelables fait que plusieurs universités algériennes orientent leurs recherches vers cet axe.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer ce mémoire qui porte sur l'une de ces énergies renouvelables qui est l'énergie éolienne.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite. Par rapport aux éoliennes à vitesse fixe ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler les puissances active et réactive produite par l'éolienne à chaque instant, mais la variation de la vitesse du vent impose un contrôle complexe, d'où la nécessité d'utiliser la commande prédictive généralisée (GPC).

La commande prédictive est une technique de commande avancée de **l'automatique**. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PID est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agroalimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale...

La commande prédictive généralisée est souvent utilisée avec, en plus, une adaptation en ligne du modèle utilisé pour réaliser les prédictions. La stratégie de commande GPC a été proposée par Clarke à l'université d'Oxford en 1987, elle est devenue l'un des algorithmes de commande prédictive les plus répandus. Elle a été très tôt implémentée avec succès dans nombreuses applications industrielles et a montré de bonnes performances et un certain degré de robustesse. L'idée à la base de la commande **GPC** est de calculer une séquence de commandes futures de telle façon qu'une fonction de coût à plusieurs composantes soit minimale sur un certain horizon de prédiction. L'indice à optimiser est une fonction quadratique qui mesure la distance entre la sortie prédite du système et une séquence de référence plus une fonction quadratique qui mesure l'effort de commande. La GPC apporte des

performances remarquables notamment en ce qui concerne la poursuite de la consigne imposée. Les paramètres de réglage ont une influence déterminante sur le comportement du système mais il n'est pas toujours facile de trouver une valeur optimale pour ces paramètres.

Le mémoire sera divisé en quatre chapitres pour décrire le travail envisagé.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne. Nous décrirons les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées pour montrer les avantages de la machine asynchrone à double alimentation surtout en grande puissance et en vitesse variable.

Dans le second chapitre, on présentera la modélisation de la turbine et de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère biphasé qui est nécessaire pour le développement de la commande et dans le repère triphasé dans les cas de fonctionnement sain.

Dans le troisième chapitre, la commande vectorielle (plus spécifiquement celle avec orientation du flux statorique) va nous permettre de réaliser une commande vectorielle de la DFIG connectée au réseau pour un fonctionnement sain.

Dans le quatrième chapitre, on propose une technique de commande appelée GPC appliquée sur la DFIG à l'aide de régulateurs GPC; il permet de mieux gérer les compromis rapidité et performances.

Pour associer les avantages des régulateurs GPC et PI, un contrôle mixte a été simulé.

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

# CHAPITRE 1 DESCRIPTION D'UNE CHAÎNE ÉOLIENNE

---

## 1.1 Introduction :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre pendant au moins les 3000 dernières années. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [7]. Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évolué. Ceci a permis à l'énergie éolienne de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Leurs stratégies de commande permettent de capter un maximum d'énergie sur une grande plage de variation de vitesse de vent afin d'améliorer la rentabilité des systèmes éoliens. La recherche a un rôle important à jouer dans ce sens et on peut notamment y introduire plus d'intelligence. Ce premier chapitre présente une description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie.

## 1.2 Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes :

### 1.2.1 Principe :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (1.1). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, Mécaniques et électriques ou d'automatique [6].

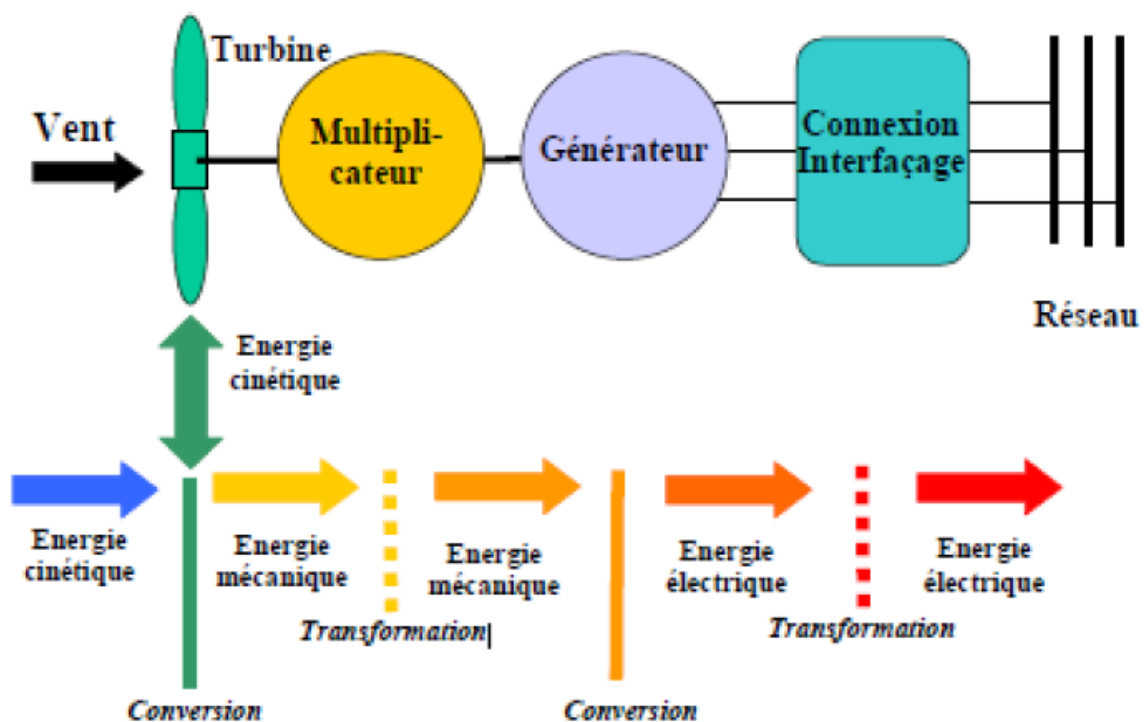


Figure 1.1. Principe de la conversion d'énergie

### 1.3 Éléments constitutifs d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement:

### 1.3.1 La tour ou le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.

### 1.3.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone

### 1.3.3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent. Plus le diamètre du rotor est grand, plus la surface balayée est importante [17], [14].

## 1.4 Différents types d'éoliennes

Les aérogénérateurs sont à **axe horizontal** ou **vertical**. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axes horizontales. Les éoliennes à **axe vertical** ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol facilement accessibles mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [6], [7].

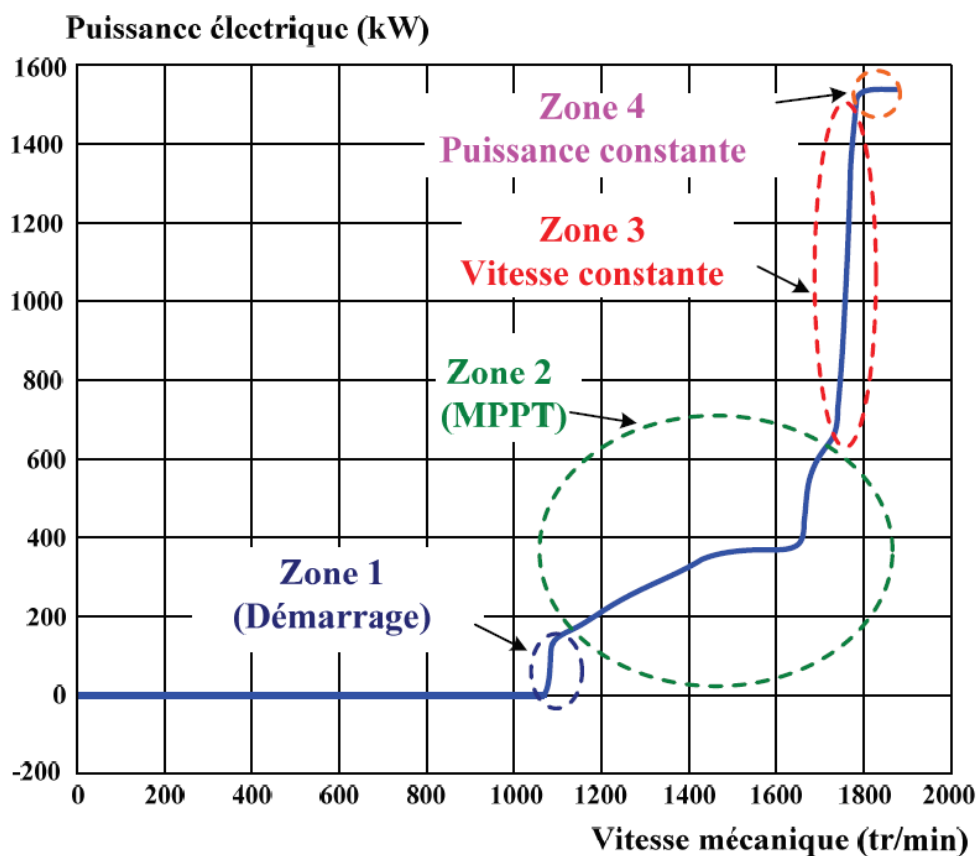
Les éoliennes à **axe horizontal** dont l'arbre est parallèle au sol sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiques à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Ce type d'éoliennes sont simples du point de vue mécanique et nécessitent un encombrement « au sol relativement faible pour le montage et la fixation de la tour [6], [14]. Le tableau (1.1) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [4].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 Kw
Moyenne	12m à 45m	De 40 kW à 1 MW
grande	46m et plus	1 MW et plus

**Tableau 1.1.** Classification des turbines éoliennes

## 1.5 Phases de fonctionnement d'une éolienne :

La figure (1.2) montre les zones de fonctionnement caractéristiques mesurées sur une éolienne de 1.5 MW [31]:



**Figure 1.2.** Zone de fonctionnement et caractéristiques d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA



On définit les zones de fonctionnement des éoliennes suivant la vitesse du vent :

- **Zone 1 ( $V < V_1$ )** : c'est la zone de démarrage de la machine. La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste assez faible.

**$V_1$**  : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine,  $V_1$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

- **Zone 2 ( $V_1 < V < V_2$ )**: est la zone d'extraction maximale de la puissance (**MPPT : Maximum Power Point Tracking**). Elle correspond au **fonctionnement à Charge Partielle (CP)**. Dans cette zone l'angle de calage des pales  $\beta$  reste constant afin d'obtenir un  $C_{pmaximal}$  ainsi la puissance maximale est captée pour chaque vitesse de vent.

**$V_2$**  : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice,  $V_2$  varie entre 11.5m/s et 15m/s.

- **Zone 3 ( $V_2 < V < V_3$ )**: Elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au **fonctionnement à Pleine Charge (PC)**.

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

- **Zone 4 ( $V > V_3$ )**: La vitesse du vent devient trop forte. La puissance est limitée à sa valeur maximale (1550 kW) grâce au système d'orientation des pales [14], [4].

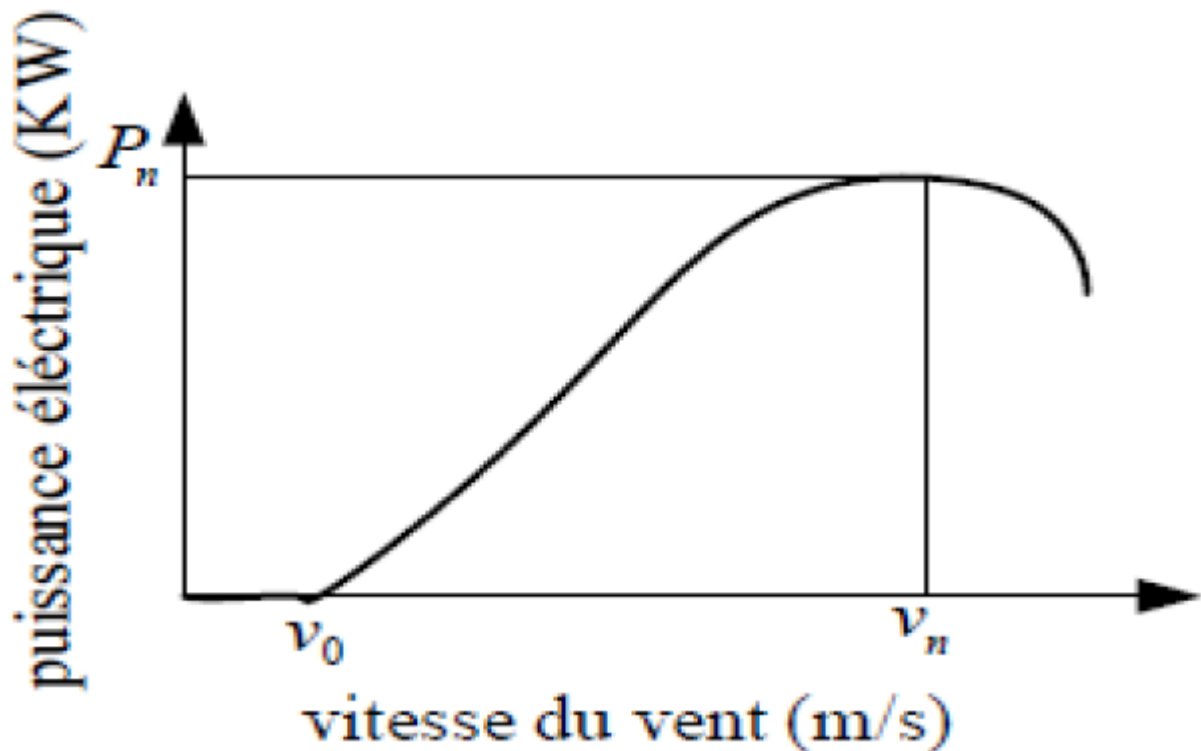
## 1.6 Principe de fonctionnement

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse  $V_p$ . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse de seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolien et commencent à tourner. Une puissance  $P_{vent}$  est alors captée et transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques. Pour le cas d'un fonctionnement de l'éolienne à vitesse fixe (connectée directement au réseau), On distingue deux technologies : les éoliennes à décrochages aérodynamique, et les éoliennes à pales orientables.

### 1.6.1 Éoliennes à décrochages aérodynamiques

Les éoliennes à décrochages aérodynamiques générant une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspondent en générale à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fourni croit avec la vitesse du vent, au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent ( Fig.1.3)



**Figure 1.3.** Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique)

On définit :

$P_n$  : La puissance nominale de l'éolienne

$V_0$  : C'est la valeur de la vitesse pour la quelle le rotor de la turbine commence à tourner.

$V_n$  : La valeur de la vitesse pour la quelle la puissance nominale est atteinte.

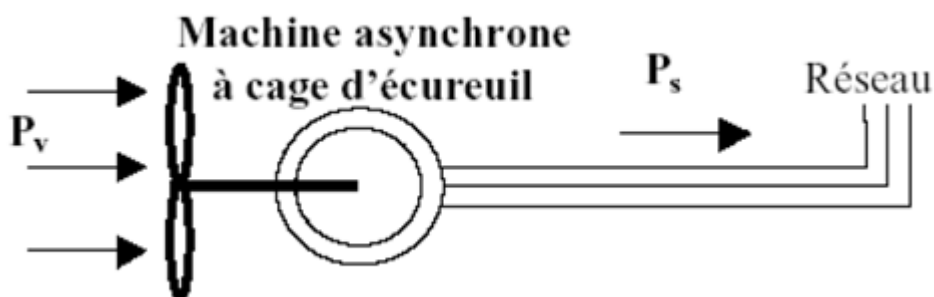
Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constant n'est donc pas possible. Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système à décrochage aérodynamique qui est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales.

### 1.6.2 Éoliennes à pales orientables

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constant la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse du vent supérieure à  $V_n$ .

## 1.7 Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (Figure 1.4). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control) [13].



**Figure 1.4.** Éolienne à vitesse fixe

Parmi ses avantages :

- Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins cher [7].

## 1.8 Fonctionnement à vitesse variable :

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique **synchrone** ou **asynchrone** [34].

Les machines **synchrone** : elles sont utilisées dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires) . Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [7].

La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines **asynchrones**. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné) [18], [6], [16].

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

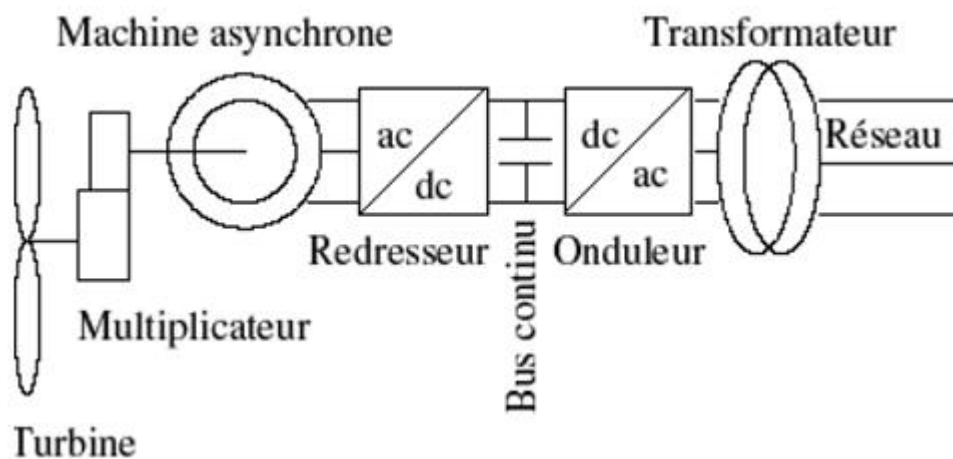
- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité [7]
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique) [7], [13].
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la

vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.

- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente[28].
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique [13].
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien [14].

## 1.9 Éolienne à machine asynchrone à cage :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la figure (1.5).



**Figure 1.5.** Éolienne à MAS piloté au stator

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la figure (1.5)). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes[16].

## 1.10 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique (figure 1.6). Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la 1ère configuration [6], [16].

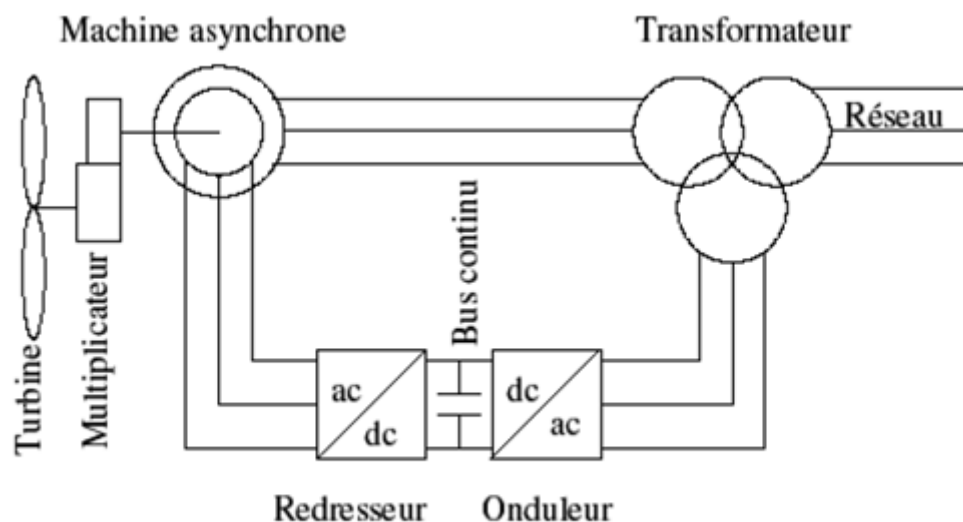


Figure 1.6. Éolienne à MADA pilotée au rotor [16]

## 1.11 Autres machines :

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les **machines à courant continu** présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids [6]. Les générateurs à **réductances variables** sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces

éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes [6], [15], [7], [16].

## 1.12 Aérogénérateur étudié :

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps quelle progressait.

Ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur.

La machine asynchrone à cage d'écureuil, par ses qualités de robustesse, de coût et desimplicité, semble bien adaptée à l'utilisation dans un système éolien. Lorsqu'elle estdirectement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante defaçon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restrictionentraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées [7]. Une solutionconsiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Le dispositif peut alorsfonctionner à vitesse variable car quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, latension est redressée puis un onduleur côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre lafréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. Ainsi elle permet d'améliorer la qualitéde la puissance électrique produite et de son rendement énergétique comme on l'a indiqué sur la figure (1.7).

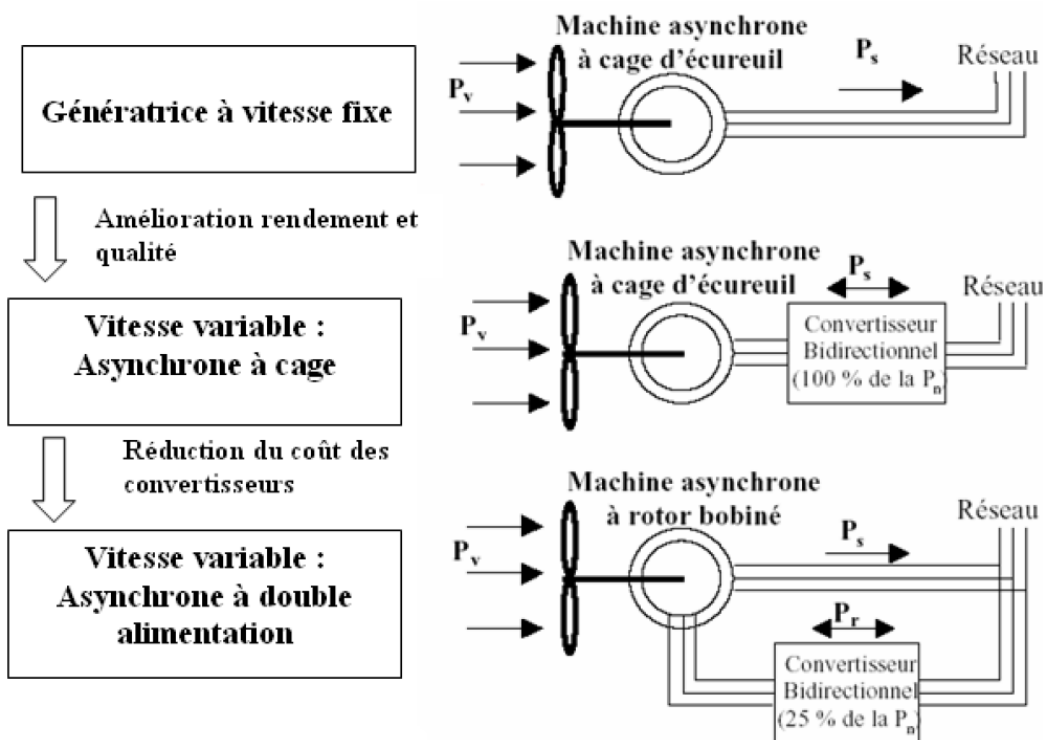


Figure 1.7. Evolution de la configuration électrique

L'inconvénient principal de ce genre de système le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs [6], [7].

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [14], [27], [7].

## 1.13 Technique d'extraction du maximum de puissance

### 1.13.1 Optimisation de l'extraction de puissance

Le fonctionnement optimal de l'aérogénérateur est atteint pour un coefficient de puissance maximal  $C_p$  qui représente le rendement aérodynamique de la turbine et dépend de la caractéristique de la turbine, celui-ci atteint cette valeur pour  $\lambda = \lambda_{opt}$  d'où la vitesse de rotation résultante:

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (1.1)$$

$\Omega_{opt}$  : vitesse de rotation optimale (rad/s)

$V_v$  : vitesse de vent (m/s).

$\lambda_{opt}$  : vitesse relative définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et vitesse du vent.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale. R

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la Figure (I.8). La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.



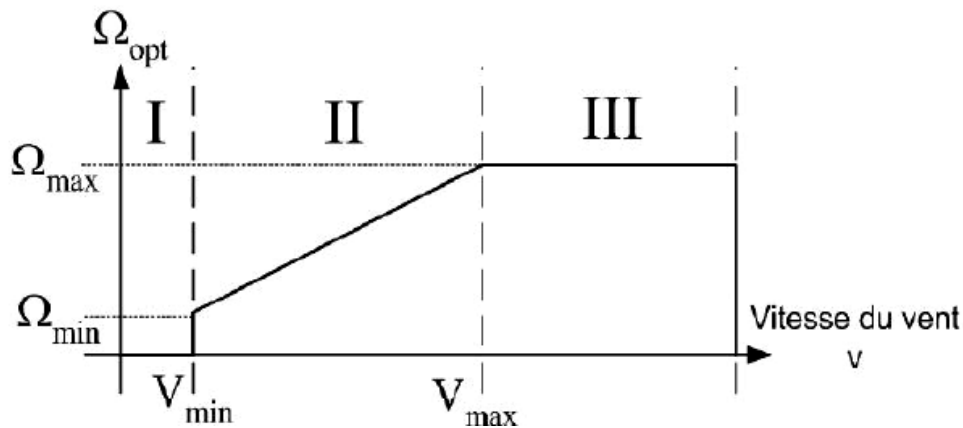


Figure 1.8. Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

### 1.13.2 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 [17].

### 1.13.3 Commande avec asservissement de la vitesse

Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. D'après la relation ( $\Omega_{opt}$ ) 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 1.9).

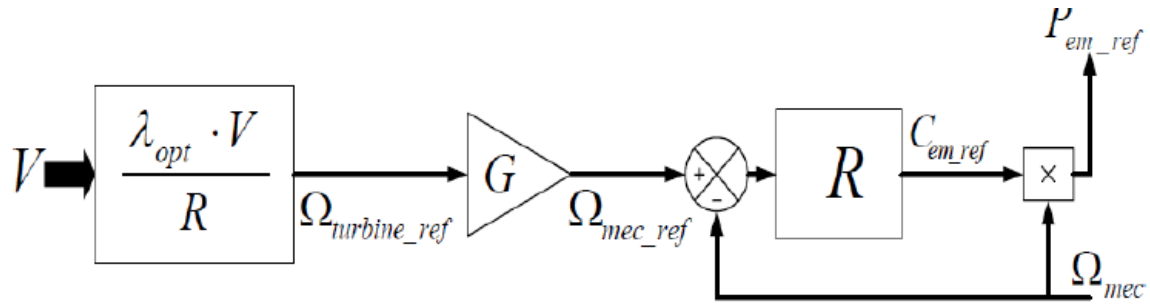


Figure 1.9 Dispositif de commande avec asservissement de la vitesse

#### 1.13.4 Commande sans asservissement de la vitesse

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. 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 :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum c = 0 = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (1.2)$$

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

$$C_{em} = C_g \quad (1.3)$$

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (1.4)$$

Le couple éolien lui-même peut être estimé à partir de la vitesse du vent et de la vitesse de la Turbine :

$$C_{aéro-estimé} = C_p \frac{\rho S V_{v-estimé}^3}{2\Omega_{turbine}} \quad (1.5)$$

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

$$\Omega_{turbine-} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (1.6)$$

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

$$V_{v-estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé}}{\lambda} R \quad (1.7)$$

On obtient donc une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = C_p \frac{\rho \pi R^5 \Omega_{mec}^2}{\lambda^3 2G^3} \quad (1.8)$$

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 :

$$C_{em-ref} = C_{p-max} \frac{\rho \pi R^5 \Omega_{mec}^2}{\lambda_{opt}^3 2G^3} \quad (1.8)$$

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

$$P_{em-ref} = C_{em-ref} \Omega_{mec} = C_{p-max} \frac{\rho \pi R^5 \Omega_{mec}^3}{\lambda_{opt}^3 2G^3} \quad (1.9)$$

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 (1.10) [4]

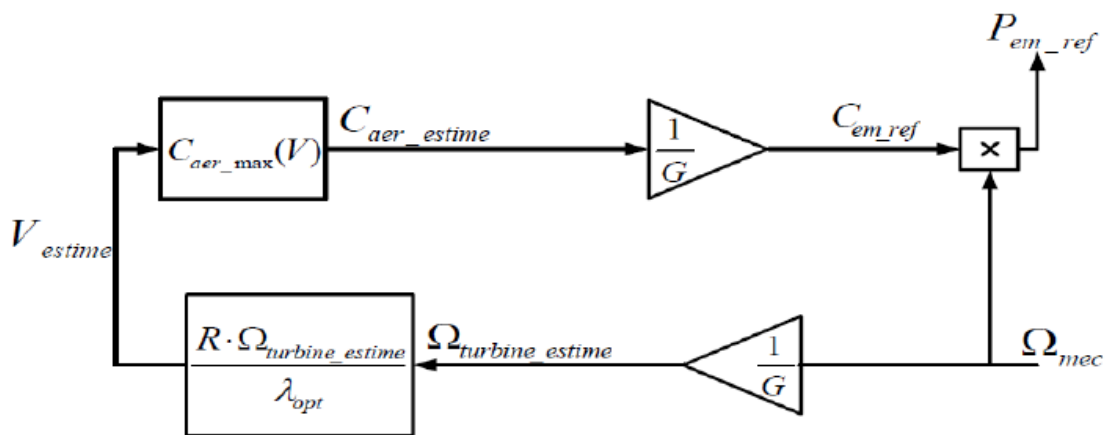


Figure 1.10. Dispositif de commande sans asservissement de la vitesse

## 1.14 Conversion électromécanique

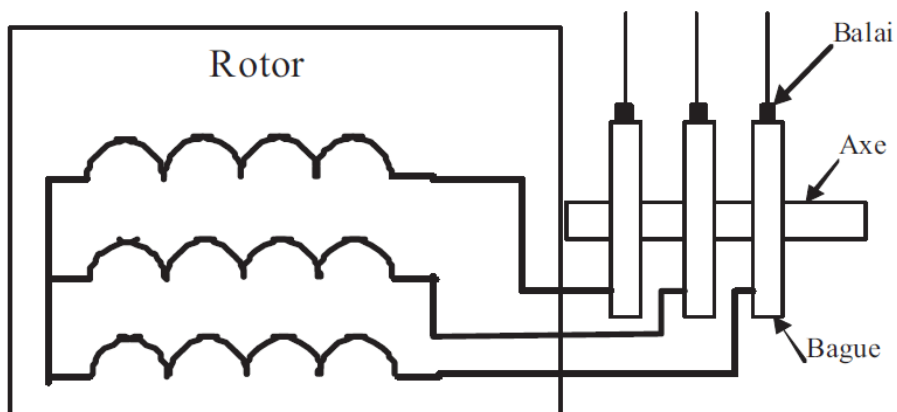
La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation. Cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en électrique implique une génératrice couplée à la turbine

### 1.14.1 Utilisation de la MADA dans la conversion électromécanique

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur). Dans ce qui suit, nous allons présenter une étude générale sur la MADA, ses applications.

### a) Définition

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (figure 1.11), cette machine peut fonctionner comme génératrice ou moteur . Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor et connecté à un onduleur [17]



*Figure.1.11.* Structure du rotor de la MADA

### b) Domaine d'applications de la MADA

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone classique et synchrone, surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [9].

## Chapitre 2    MODELISATION DE LA MADA

---

### 2.1 Première Section

#### 2.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une modélisation du :

- Système de conversion d'énergie éolienne « la turbine ».
- La génératrice asynchrone à double alimentation dans les cas de fonctionnement sain.
- L'alimentation « nous allons faire une modélisation de l'onduleur de tension ainsi que de la commande MLI.

#### 2.1.2 Caractéristiques du vent et des turbines : aspects aérodynamiques

##### a) Loi de Betz– notions théoriques

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 2-1 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit,  $\frac{V_1+V_2}{2}$  la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $s$  des pales en une seconde est:

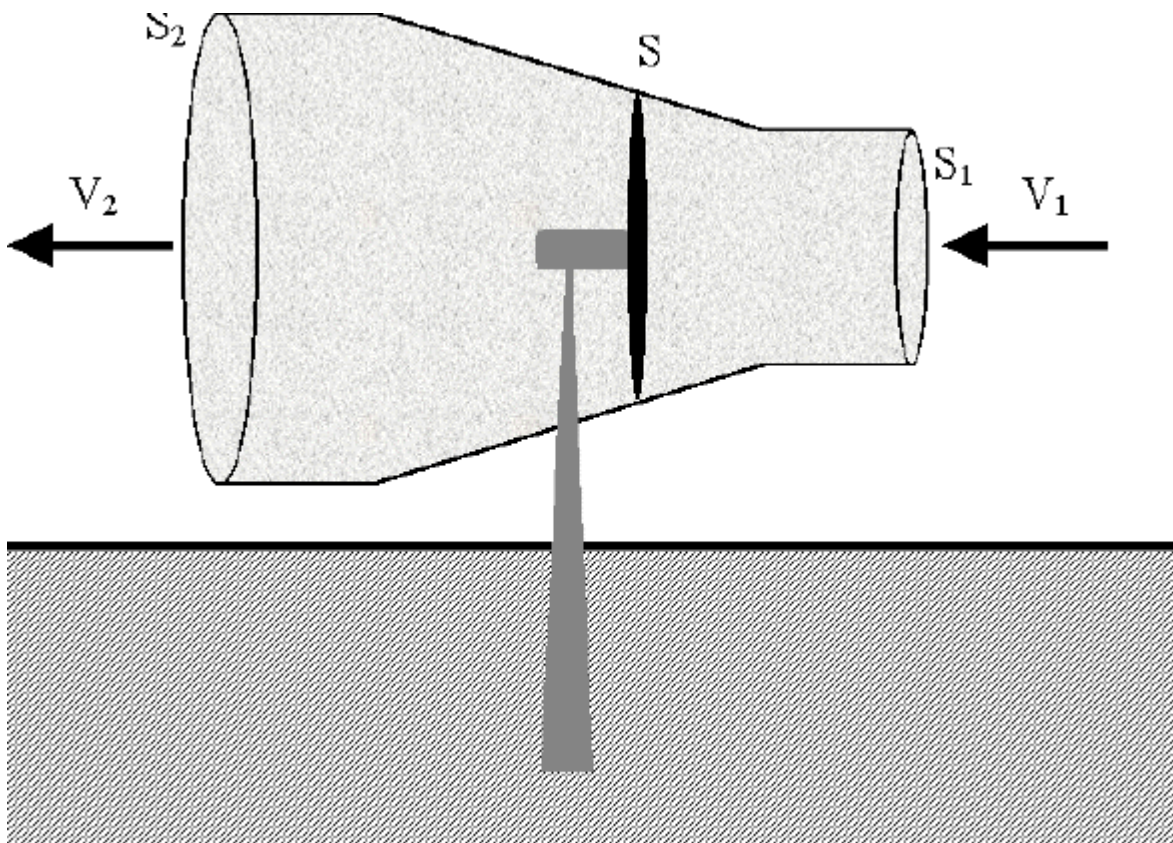
$$m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)}{2} \quad (2.1)$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton)

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2.2)$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (2.1)

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (2.3)$$



**Figure 2.1.** Tube de courant autour d'une éolienne

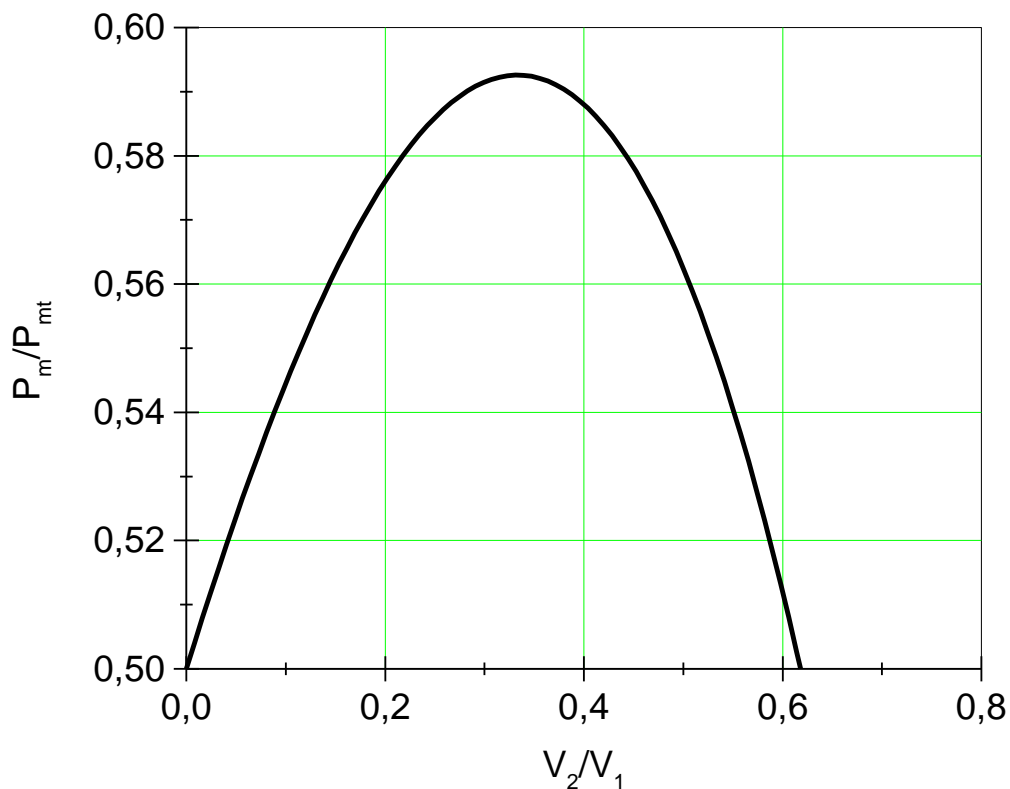
Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_m$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (2.3)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (2.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Fig. 2.2), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance «  $C_p$  » présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie 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 (Fig 2.2) [17][10].



**Figure 2.2.** Coefficient de puissance



## 2.2 Modélisation d'une turbine éolienne

Pour faire mieux apparaître l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent, on s'intéresse à la modélisation de la turbine [17].

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$ , qui entraînera une génératrice (DFIG) à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ . La figure (2.3) montre le schéma d'une turbine éolienne.

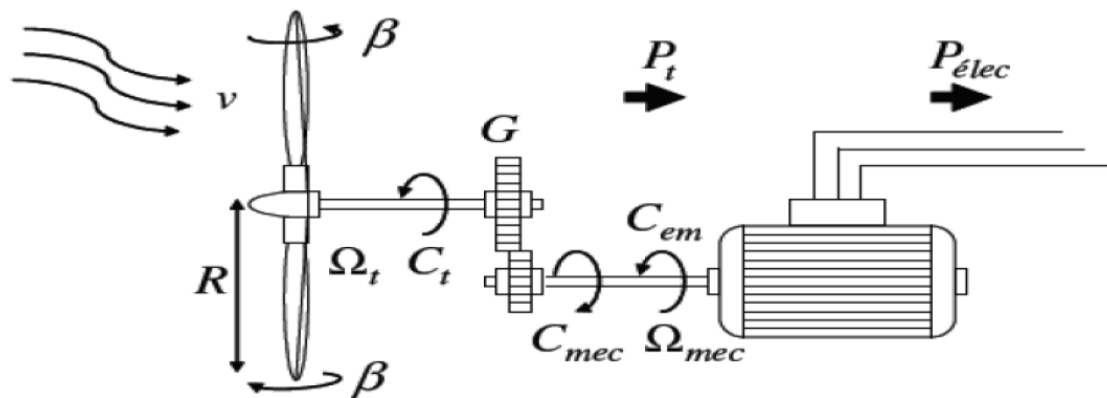


Figure 2.3. Schéma de la turbine éolienne

### 2.2.1 La puissance d'une éolienne

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho s V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.6)$$

Avec :

$\rho$ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale) ;

$s$ : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

$R$ : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

$V_v$ : est la vitesse du vent (en m/s).

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

## 2.2.2 La puissance aérodynamique

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient  $C_p$  appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [7][10]. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aéro} = C_p P_v = C_p (\lambda \beta) \frac{\rho s V_v^3}{2} \quad (2.7)$$

$C_p$ : Coefficient de puissance défini comme suit[6] :

$$C_p = 7.9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda^1 + 0.001 \quad (2.8)$$

$\beta$ : Angle d'orientation des pales ;

$\lambda$ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ( $\Omega_{turbine} R$ ), et la vitesse du vent  $V_v$

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{V_v} \quad (2.9)$$

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

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé directement par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho s V_v^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.10)$$

## 2.2.3 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 :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (2.11)$$

$C_g$ : Couple issu du multiplicateur ;

$C_{aéro}$  : Couple aérodynamique ;

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.12)$$

## 2.2.4 Équation mécanique de l'arbre

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

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (2.13)$$

$J_t$ : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

$C_{mec}$ : c'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique produit par la génératrice.

$C_{vis}$ : Le couple de frottement visqueux;

$C_g$ : le couple issu du multiplicateur

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.14)$$

le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (2.15)$$

## 2.2.5 Schéma bloc du modèle de la turbine

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 (Fig. 2.4).

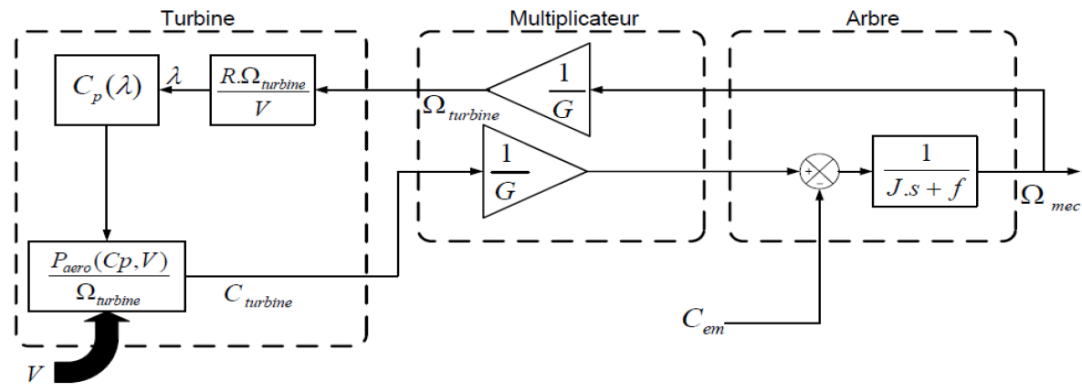


Figure. 2.4. Schéma bloc du modèle de la turbine

## 2.3 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation « sain »

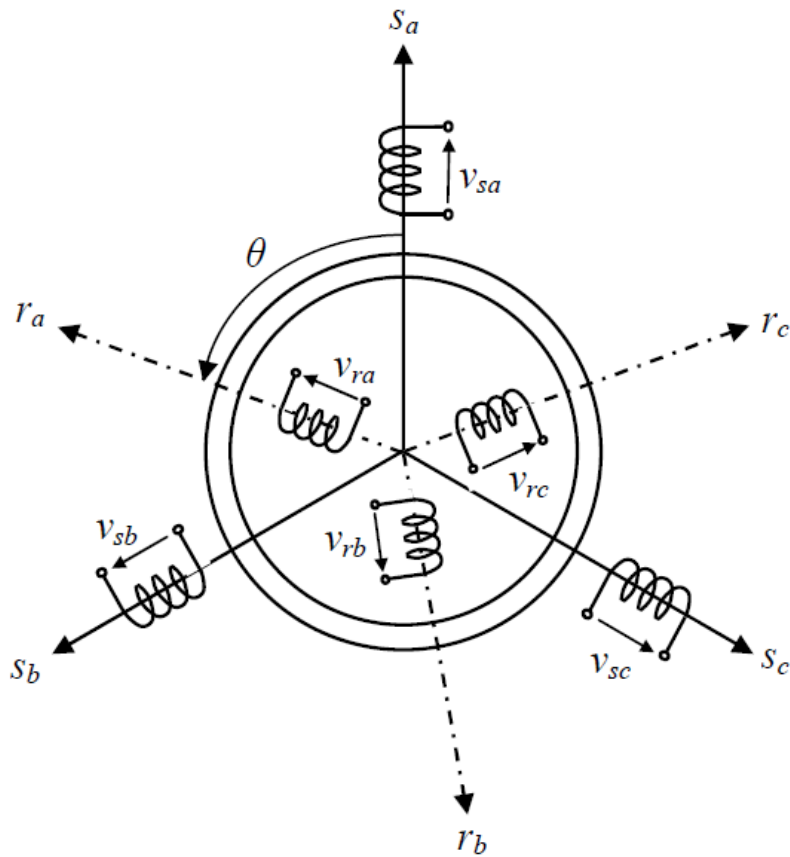
La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec les répartitions de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes afin de pouvoir élaborer un modèle simple.

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

### 2.3.1 Modèle de la MADA dans le plan « ABC »

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la figure (2.5).

Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique  $\theta$  définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statorique et rotorique. [24].



**Figure.2.5:** Représentation de la MADA dans le système triphasé

### a) Équations générales de la MADA

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

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (2.16)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (2.17)$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$R_s$  et  $R_r$  : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

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

$$[\varphi_s] = [[L_s][I_s] + [L_m][I_r]] \quad (2.18)$$

$$[\varphi_r] = [[L_m][I_s] + [L_r][I_r]] \quad (2.19)$$

Avec :

$L_s$  : Inductance cyclique statorique

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique

$L_m$  : Inductance Mutuelle cyclique entre stator et rotor

En remplaçant les relations (2.16) et (2.17) respectivement dans les relations (2.18) et (2.19), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_s = [R_s][I_s] + [L_s] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} [L_m][I_r] \\ V_r = [R_r][I_r] + [L_r] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} [L_m][I_s] \end{cases} \quad (2.20)$$

## b) Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = P[I_s] \frac{d}{dt} ([L_m][I_r]) \quad (2.21)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega_r \quad (2.22)$$

Avec :

$J$ : le nombre d'inertie de la machine. [Kg/m<sup>2</sup>].

$f_r$ : le coefficient de frottement. [Kg/m<sup>2</sup>/s].

$C_{em}$ : Coupe électromagnétique. [N.m].

$C_r$ : Couple de charge. [N.m].

### 2.3.2 Modèle de la MADA « sain » dans le plan dq

#### a) La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [24][11].

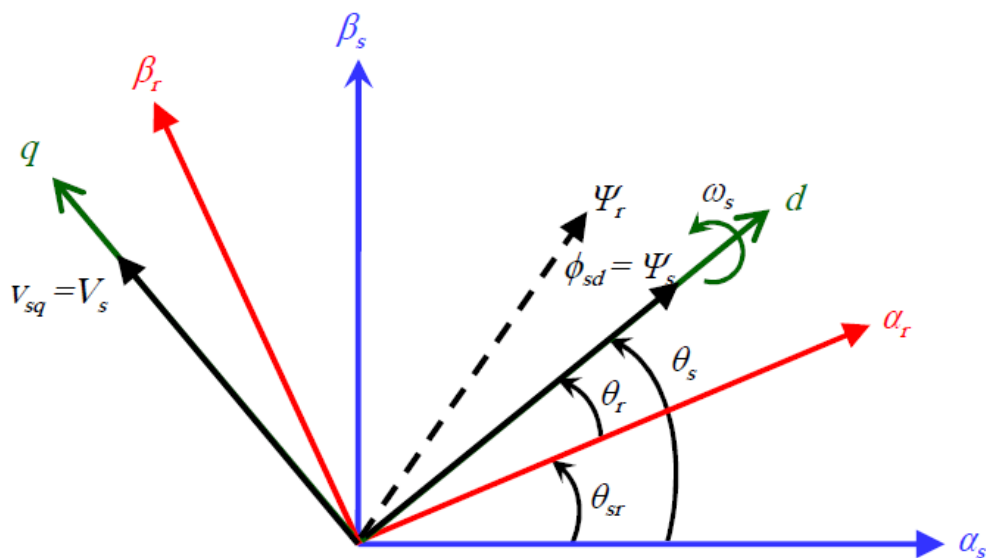


Figure.2.6. Orientation du repère de park

#### b) Equations des tensions

Les équations de la MADA sont les suivantes

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.23)$$

### c) Équations des flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.24)$$

### d) Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être exprimé en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques par l'expression suivantes :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{ds} i_{qr} - \varphi_{qs} i_{dr}) \quad (2.25)$$

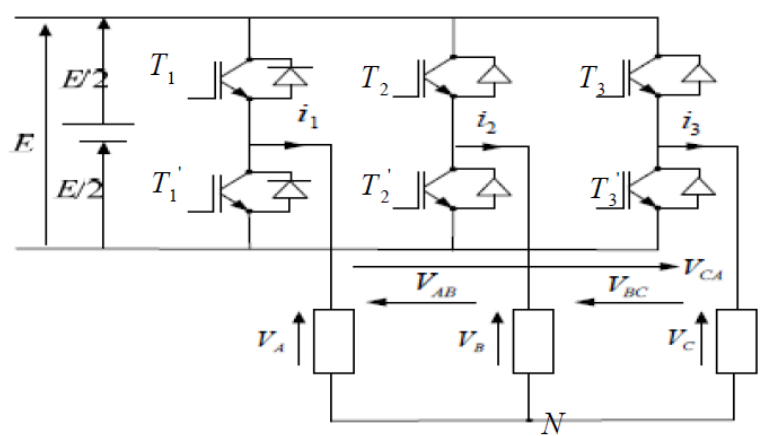
## 2.4 Modélisation de l'onduleur de tension « côté rotor »

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. Cette hypothèse nous permet de faciliter la commande du convertisseur. Ainsi la bidirectionnalité de 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 [12]. Il est constitué des interrupteurs statiques  $T_1, T_2, T_3, T_1', T_2', T_3'$  montés en antiparallèle par des diodes de récupération, afin de renvoyer le courant négatif vers la source. Le pilotage de l'onduleur se fait par des fonctions logiques, les tensions appliquées à la machine se déduisent de la tension d'entrée de l'onduleur " E " et des signaux logiques caractérisant l'état de chaque interrupteur :



Si  $C_i(t) = 1$  alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert.

Si  $C_i(t) = 0$  alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant. Avec  $i=1, 2, 3$



**Figure.2.7.** Onduleur triphasé à deux niveaux

Les tensions composées aiguillées par l'onduleur sont :

$$V_{AB} = V_A - V_B = E(C_1 - C_2) \quad (2.26)$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = E(C_2 - C_3) \quad (2.27)$$

$$V_{CA} = V_C - V_A = E(C_3 - C_1) \quad (2.28)$$

Soit sous forme matricielle :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

On considère que les tensions sont équilibrées, nous avons :

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (2.30)$$

Les tensions simples s'écrivent :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{NA} \\ V_{NB} \\ V_{NC} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

### 2.4.1 Stratégie de commande

Le principe de la stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoidale 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 (Fig 2.8) . 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  $f_{ref}$ :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (2.32)$$

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

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (2.33)$$

### 2.4.2 Algorithme de commande

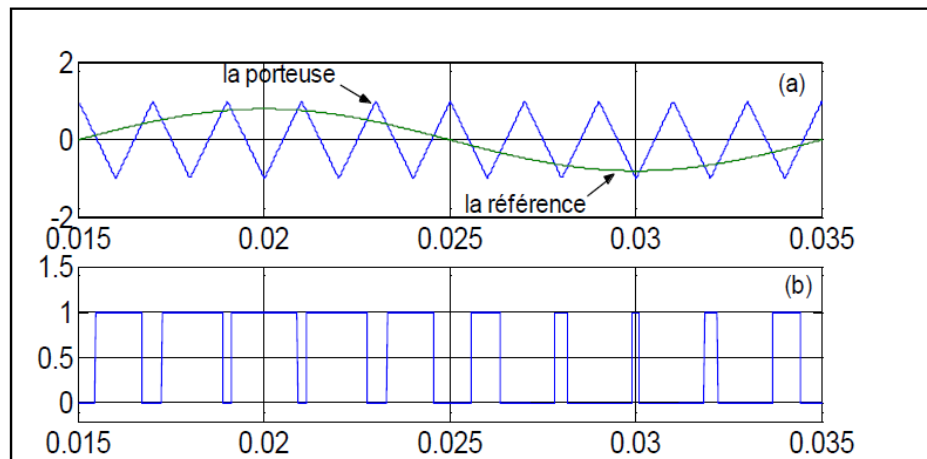
L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [24]:

Etape 1

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_p & \Rightarrow & V_k = E \\ V_{ref} < U_p & \Rightarrow & V_k = -E \end{cases} \quad (2.34)$$

Tel que E est la tension du bus continu.

$$\begin{cases} V_k = E & \Rightarrow & C = 1 \\ V_k = -E & \Rightarrow & C = 0 \end{cases} \quad (2.35)$$



**Figure.2.8.** Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse

## 2.5 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre la modélisation de la turbine éolienne et la génératrice asynchrone à double alimentation dans les cas de fonctionnement sain . Nous avons également présenté la modélisation de l'onduleur de tension, et sa stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

# Chapitre 3    **COMMANDE VECTORIELLE DE LA**

## **MADA**

---

### **3.1 Introduction**

Nous avons 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. Dans cette optique une commande vectorielle par orientation de flux statorique est mise en œuvre avec contrôle de puissance réactive statoriques et réglage de la vitesse de rotation de la MADA afin de maximiser la puissance active développée par les enroulements statoriques. Cette commande est élaborée et testée en synthétisant des régulateurs classiques de type Proportionnel - Intégral. Ensuite sous environnement MATLAB/Simulink, nous présenterons les résultats qui permettent d'analyser le comportement des grandeurs de la MADA intégrée dans le système éolien.

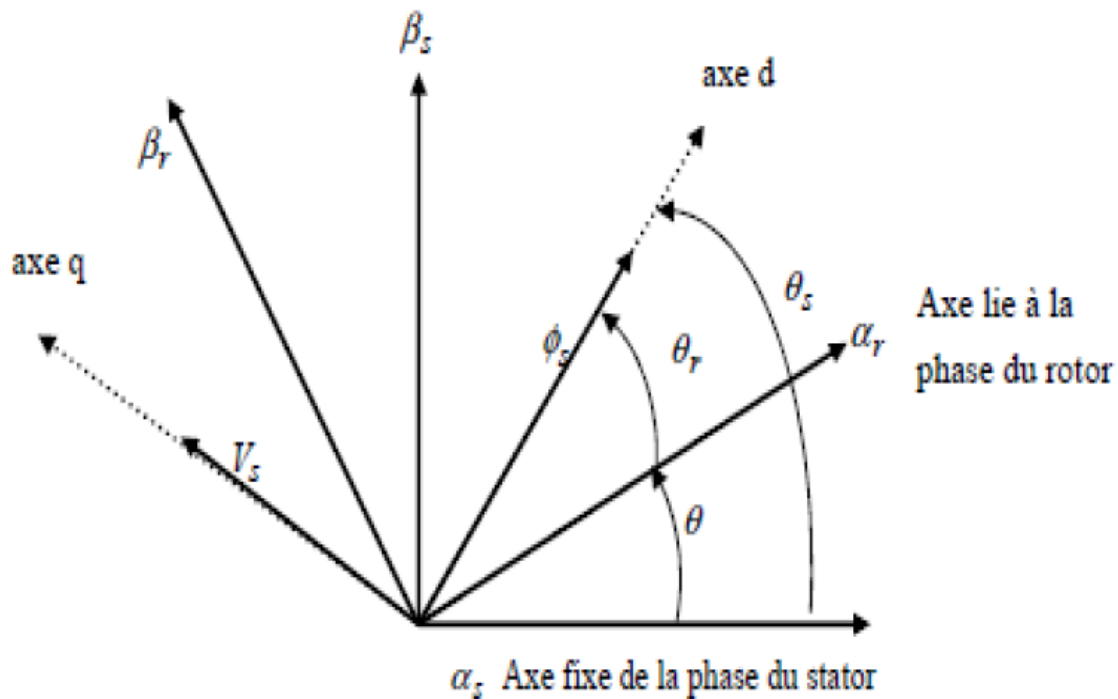
### **3.2 Commande vectorielle de la MADA**

La technique du contrôle vectoriel repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Pour le cas du contrôle vectoriel de la MADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau [26]. Pour le cas de ce travail, le référentiel ( $d$ ,  $q$ ) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté

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

### 3.3 Principe de la commande à flux orienté

Dans ce travail, le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la DFIG est exposé. Ainsi, comme il est montré dans la figure (3.1), le flux sera callé sur l'axe «  $d$  » et la tension du stator sur l'axe «  $q$  », cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié [23].



**Figure 3.1.** Vecteurs tension et flux statoriques dans le système d'axe choisi

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \cdot \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (3.1)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux  $\varphi_{ds}$  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 «  $q$  » [20]

Dans le repère triphasé les tensions statoriques s'expriment par l'expression suivante :

$$[V_s] = \left[ R_s [i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \right] \quad (3.2)$$

« $R_s$  » étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes, l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (3.3)$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \end{cases} \quad (3.5)$$

### 3.3.1 Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations de la composante directe et en quadrature du flux statorique (3.5), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.6)$$

### 3.3.2 Expression des puissances active et réactive

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [22] [26] :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \\ Q_s = V_{qs}I_{ds} + V_{ds}I_{qs} \end{cases} \quad (3.7)$$

En adaptant ces équations au système d'axes (d, q) choisi, le modèle de la MADA dans le régime permanent donne:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (3.8)$$

En remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions données par l'équation (3.6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3.9)$$

De l'expression (3.4) nous pouvons écrire :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.10)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \quad (3.11)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante « $L_m$ » comme 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  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  prèsimposée par le réseau.

### 3.3.3 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 leurs expressions, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{dr} + \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \quad (3.12)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe «  $d$  » et «  $q$  » sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (2.23). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.13)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [21] [25] [26]:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.14)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) S\right] I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) S\right] I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.15)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

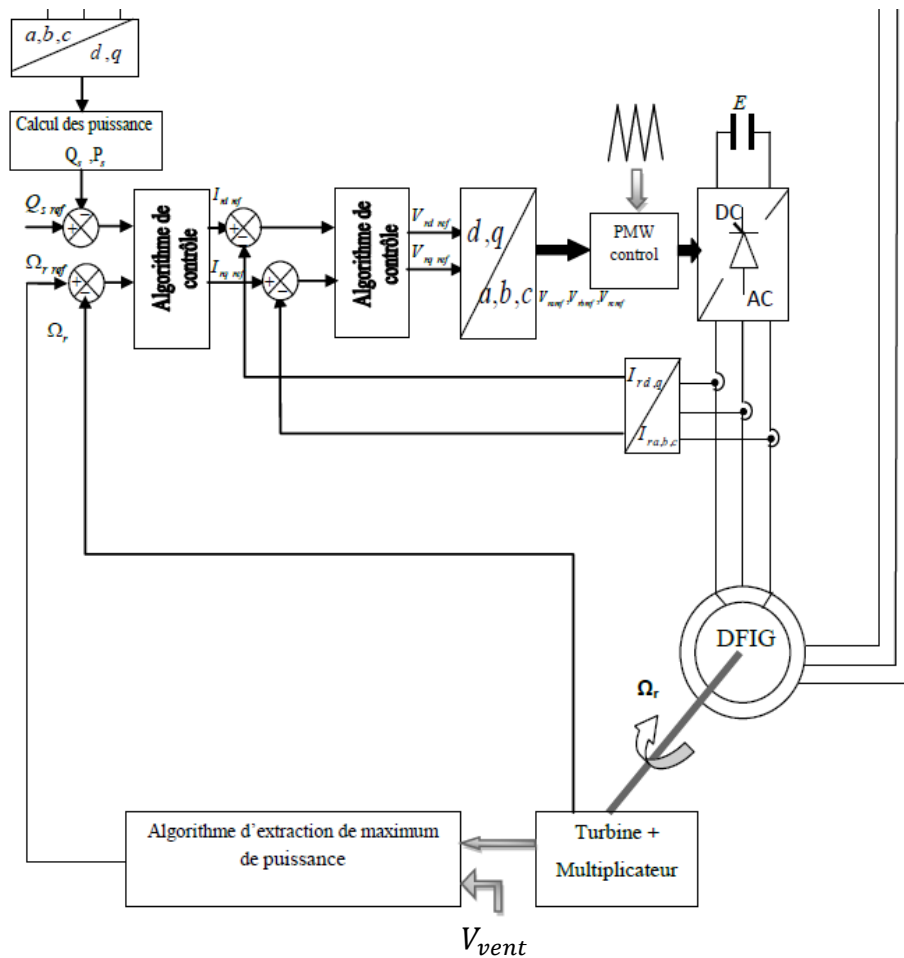


$(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})$  : est le terme de couplage entre les deux axes ;

$g\omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s}$  : Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

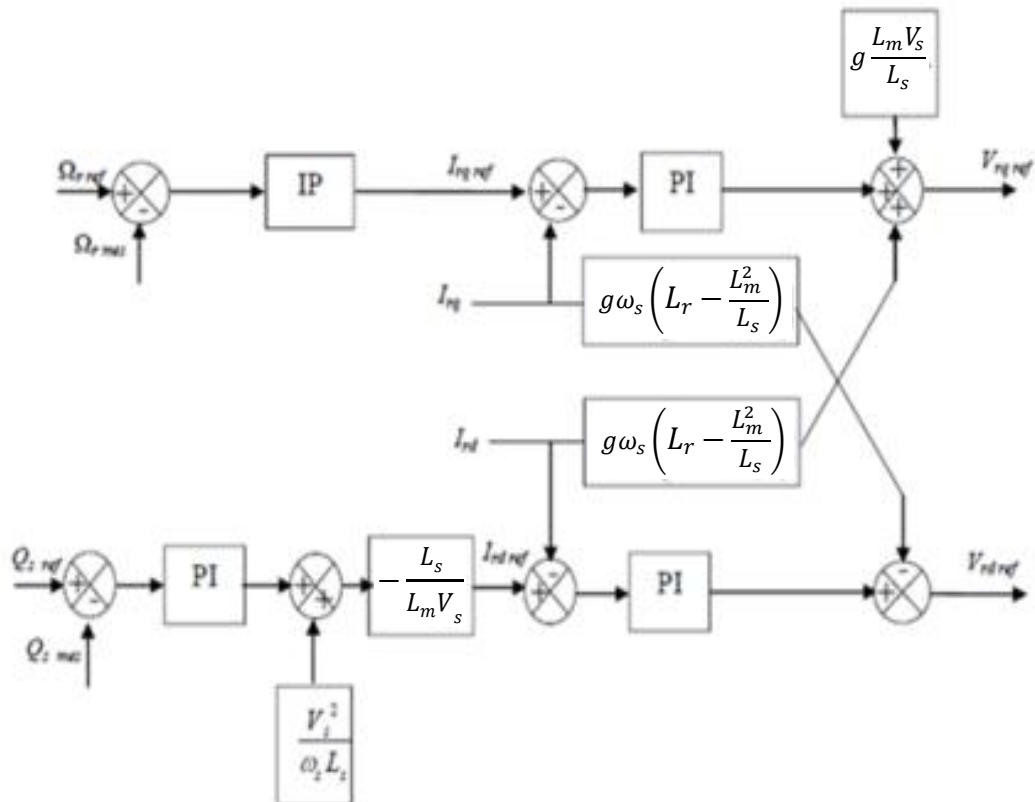
### 3.3.4 Schéma synoptique du contrôle de la MADA

Le schéma synoptique du contrôle de la MADA est représenté par la figure (3.2). La génératrice est connectée directement au réseau du côté statorique, de plus, le circuit rotorique est alimenté par une source de tension continue supposée constante à travers un onduleur commandé par la technique MLI.



**Figure 3.2.** Schéma synoptique du contrôle indirect de la puissance réactive et du réglage de vitesse de rotation de la MADA

Le schéma ci-dessous (Fig.3.3) montre que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence du couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la vitesse de rotation pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique.



**Figure 3.3.** Schéma bloc de réglage de puissance réactive

Nous allons adopter des régulateurs de type classique (PI et IP) nécessaires à la réalisation de la commande en puissance réactive et du réglage de vitesse de la MADA. Le contrôle des courants rotoriques se fait par des régulateurs Proportionnel Intégral (PI). Un régulateur (PI) est utilisé pour le réglage de puissance réactive et un régulateur (IP) pour le réglage de vitesse de rotation, ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle.

Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre la vitesse de rotation et la puissance réactive de références et leurs valeurs mesurées

### 3.4 Dimensionnement de régulateur PI

On utilise le régulateur PI pour le contrôle de Puissance réactive ( $Q_s$ ) et les courants rotoriques ( $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$ ). La figure (3.4) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI

$K_p$  : est le gain proportionnel du régulateur ;

$K_i$  : est le gain intégral du régulateur

Les fonctions de transfert qui donne les courants rotoriques ( $I_{dr}$ ) et ( $I_{qr}$ )

en fonction de  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  respectivement (voir l'équation (3.15)) ainsi la fonction de transfert qui donne  $Q_s$  en fonction de  $I_{dr}$  sont de premier ordre .

#### 3.4.1 Régulateurs PI de courants

La boucle de régulation du puissance est représentée par :

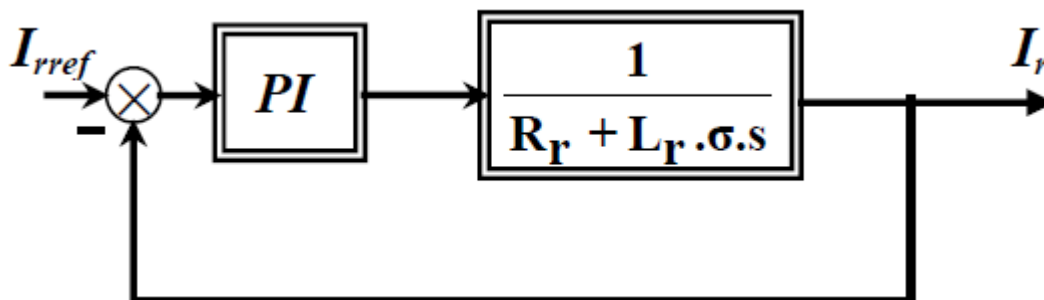


Fig.3.4. Boucle de la régulation des courants rotoriques ( $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$ )

.On considère la fonction de transfert  $G_i(S)$  comme suit :

$$G_i(S) = \frac{1}{R_r + S\sigma L_r} \quad \text{avec} \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (3.16)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{i0}(S) = (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}) (\frac{1}{R_r + S\sigma L_r}) \quad (3.17)$$

$$G_{i0}(S) = K_p \left( S + \frac{K_{ii}}{K_{pi}} \right) \frac{1/\sigma L_r}{S \frac{R_r}{\sigma L_r} + S} \quad (3.18)$$

Par compensation, On obtient :

$$\frac{K_{ii}}{K_{pi}} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \quad (3.19)$$

$$G_{i0}(S) = \frac{K_{pi}}{\sigma L_r S} \quad (3.20)$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$G_{iF}(S) = \frac{\frac{K_{pi}}{\sigma L_r S}}{1 + \frac{K_{pi}}{\sigma L_r S}} = \frac{1}{\frac{\sigma L_r S}{K_p} + 1} = \frac{1}{\tau_i S + 1} \quad (3.21)$$

Finalement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_{ii}}{K_{pi}} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \\ \frac{\sigma L_r}{K_{pi}} = \tau_i \end{array} \right. \text{d'où} \left\{ \begin{array}{l} K_{ii} = \frac{R_r}{\tau_i} \\ K_{pi} = \frac{\sigma L_r}{\tau_i} \end{array} \right. \quad (3.22)$$

NB : Pour la boucle de régulation de courants  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$ , on utilise les mêmes gains.

### 3.4.2 Régulateur IP de la vitesse

La fonction de transfert de la vitesse :  $G_v(S)$

On a :

$$(JS + f)\Omega = C_{em} \quad (3.23)$$

$$(JS + f)\Omega = P \frac{L_m}{L_s} \Phi_{ds} I_{qr} \quad (3.24)$$

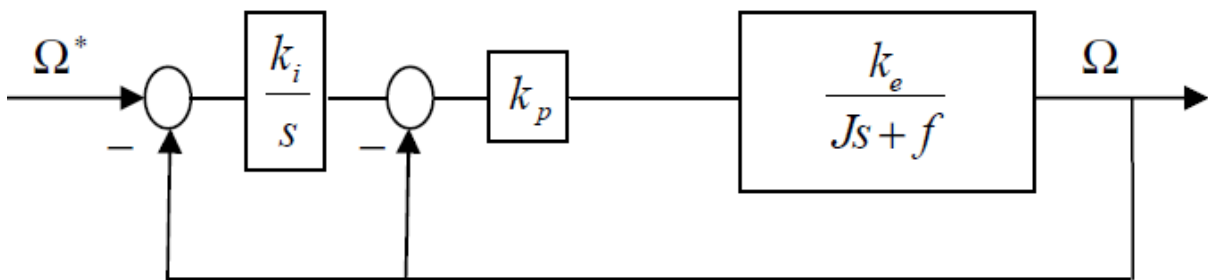
$$\Omega = \frac{K_e}{JS+f} I_{qr} \quad (3.25)$$

$$\text{Avec : } K_e = \frac{PL_m V_s}{L_s \omega_s} \quad (3.26)$$

Fonction de transfert :

$$G_v(S) = \Omega / I_{qr} = K_e / (JS + f) \quad (3.27)$$

Fonction de transfert en boucle fermée :



**Figure 3.5.** Boucle de régulation de la vitesse  $\Omega$

Boucle interne :

$$G_{Fv}(S) = \frac{\frac{K_p \Omega K_e}{JS+f}}{1 + \frac{K_p \Omega K_e}{JS+f}} = \frac{K_p \Omega K_e}{JS+f + K_p \Omega K_e} \quad (3.28)$$

Boucle externe :

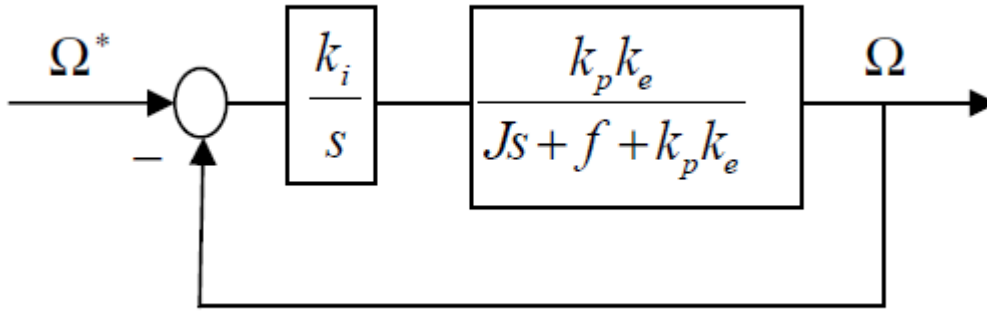


Figure 3.6. Boucle externe

$$G_{Fv}(S) = \frac{\frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J S^2 + (f + K_e K_{p\Omega}) S}}{1 + \frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J S^2 + (f + K_{p\Omega} K_e) S}} \quad (3.29)$$

$$G_{Fv}(S) = \frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J S^2 + (f + K_{p\Omega} K_e) S + K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}} \quad (3.30)$$

$$G_{Fv}(S) = \frac{\frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J}}{S^2 + \frac{(f + K_{p\Omega} K_e)}{J} S + \frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J}} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (3.31)$$

Par identification :

$$\begin{cases} \frac{K_{p\Omega} K_e K_{i\Omega}}{J} = \omega_n^2 \\ \frac{f + K_e K_{p\Omega}}{J} = 2\xi\omega_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{i\Omega} = \frac{\omega_n^2 J}{K_{p\Omega} K_e} \\ K_{p\Omega} = \frac{(2\xi\omega_n - f) J}{K_e} \end{cases} \quad (3.32)$$

$$\begin{cases} K_{i\Omega} = \frac{\omega_n^2 J}{K_{p\Omega} K_e} \\ K_{p\Omega} = \frac{(2\xi\omega_n - f) J}{K_e} \end{cases} \quad (3.33)$$

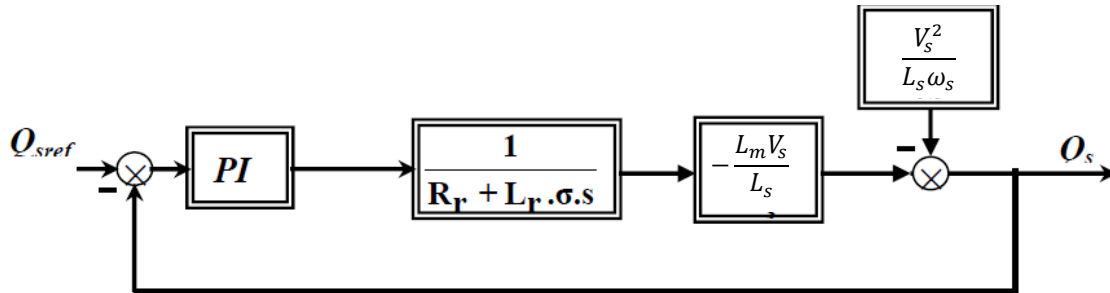
$\xi$  : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimal ; On choisit le coefficient d'amortissement  $\xi=0.7$ . Letemps de réponse à 5% est donné par :

$$t_r = \frac{3}{\xi \omega_n} \quad (3.34)$$

### 3.4.3 Régulateur de la puissance réactive statorique $Q_s$

La boucle de régulation de la puissance réactive statorique  $Q_s$  est représentée par :



**Figure 3.7.** Boucle de régulation de la puissance réactive statorique  $Q_s$

On considère la fonction de transfert  $G_{Qs}(S)$  comme suit :

$$G_{Qs}(S) = \frac{L_m V_s}{L_s (R_r + L_r \sigma S)} \quad (3.35)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{oQs}(S) = \left( K_{pP} + \frac{K_{iP}}{S} \right) \left( \frac{L_m V_s}{R_r L_s + \sigma L_s L_r S} \right) \quad (3.36)$$

$$G_{oQs}(S) = K_{pP} \left( S + \frac{K_{iP}}{K_{pP}} \right) \frac{1}{S} \left( \frac{L_m V_s / \sigma L_s L_r}{\frac{R_r L_s}{\sigma L_s L_r} + S} \right) \quad (3.37)$$

$$G_{oQs}(S) = K_{pP} \left( S + \frac{K_{iP}}{K_{pP}} \right) \frac{1}{S} \left( \frac{L_m V_s / \sigma L_s L_r}{\frac{R_r}{\sigma L_r} + S} \right) \quad (3.38)$$

Par compensation ; On obtient :

$$\frac{K_{iP}}{K_{pP}} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \quad \Rightarrow \quad G_{oQs}(S) = \frac{K_{pP} L_m V_s}{\sigma L_s L_r S} \quad (3.39)$$

En boucle fermée .On a :

$$G_{FQs}(S) = \frac{K_{pP} L_m V_s / \sigma L_s L_r S}{1 + \frac{K_{pP} L_m V_s}{\sigma L_s L_r S}} = \frac{1}{\frac{\sigma L_s L_r}{K_{pP} L_m V_s} S + 1} = \frac{1}{\tau_p S + 1} \quad (3.40)$$

Finalement :

$$\begin{cases} \frac{K_{iP}}{K_{pP}} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \\ \frac{\sigma L_s L_r}{K_{pP} L_m V_s} = \tau_p \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{iP} = K_{pP} \frac{R_r}{\sigma L_r} \\ K_{pP} = \frac{1}{\tau_p} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m V_s} \end{cases} \quad (3.41)$$

### 3.5 Résultats

Dans cette partie on présente l'analyse du comportement des grandeurs de la DFIG avec orientation du flux statorique. On a utilisé le logiciel Matlab-Simulink, avec régulateur PI. La Figure 3.8 montre l'allure de la vitesse de rotation de la génératrice. On constate qu'après le démarrage la dynamique de la vitesse est rapide et elle suit sa référence.

La Figure 3.9 montre l'allure de la puissance réactive et sa référence. On constate qu'elle est insensible de la variation de la vitesse du vent sauf l'augmentation des oscillations au moment de la variation du vent.

Les deux courbes du courant  $I_{rd}$ ,  $I_{rq}$  de la Figure 3.11 suivent leurs références présentant des oscillations dues à l'onduleur.



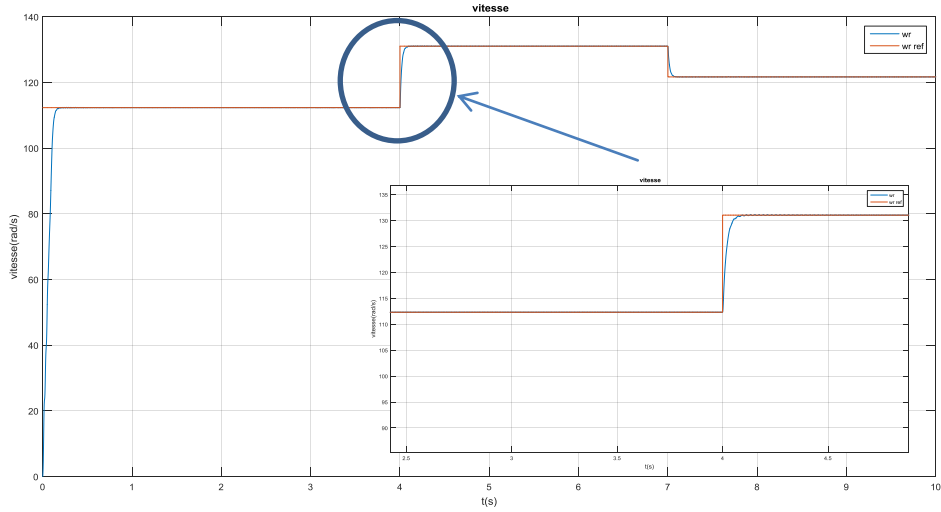


Figure 3.8 Vitesse de rotation de DFIG avec variation de la vitesse du vent.

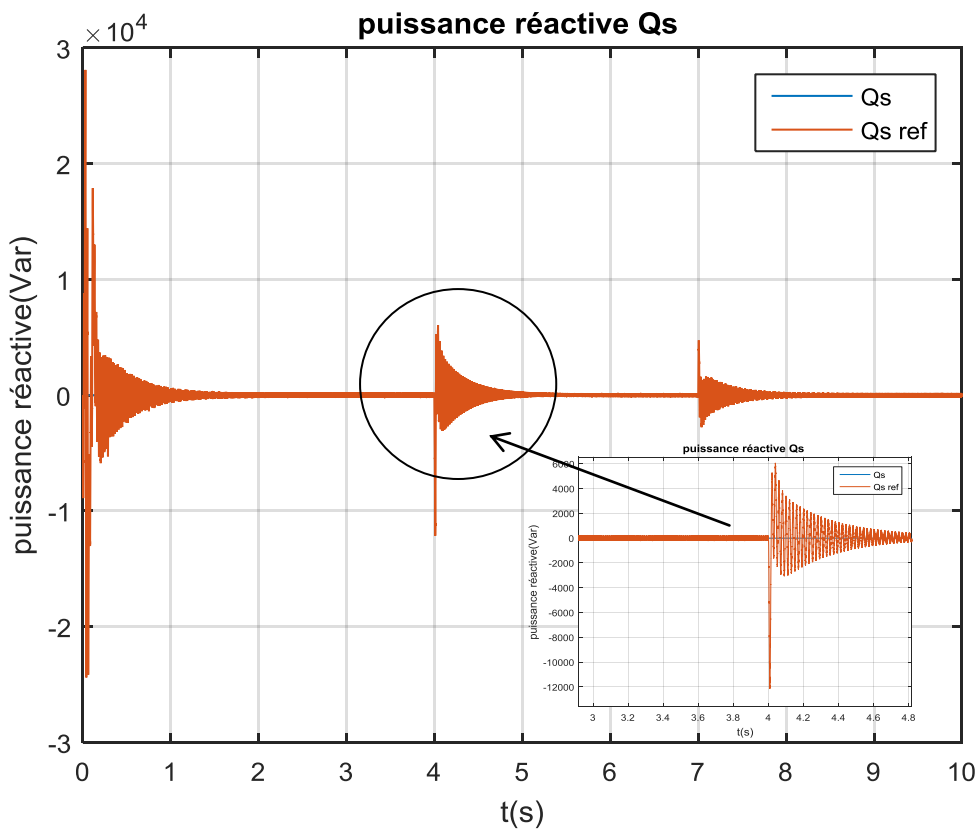


Figure 3.9 Puissance réactive statorique avec variation de la vitesse du vent

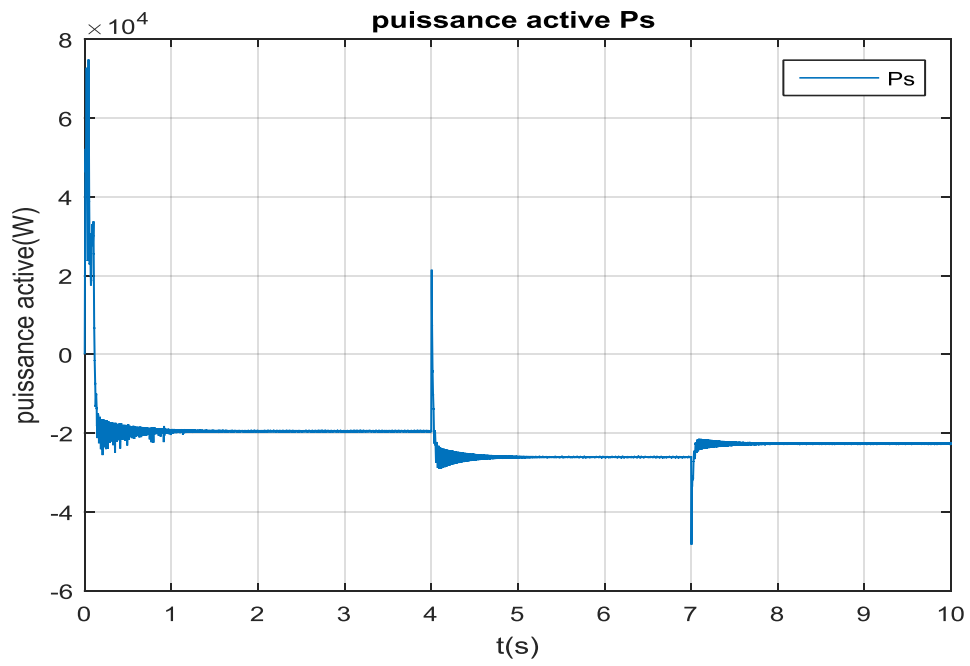


Figure 3.10. La puissance active statorique

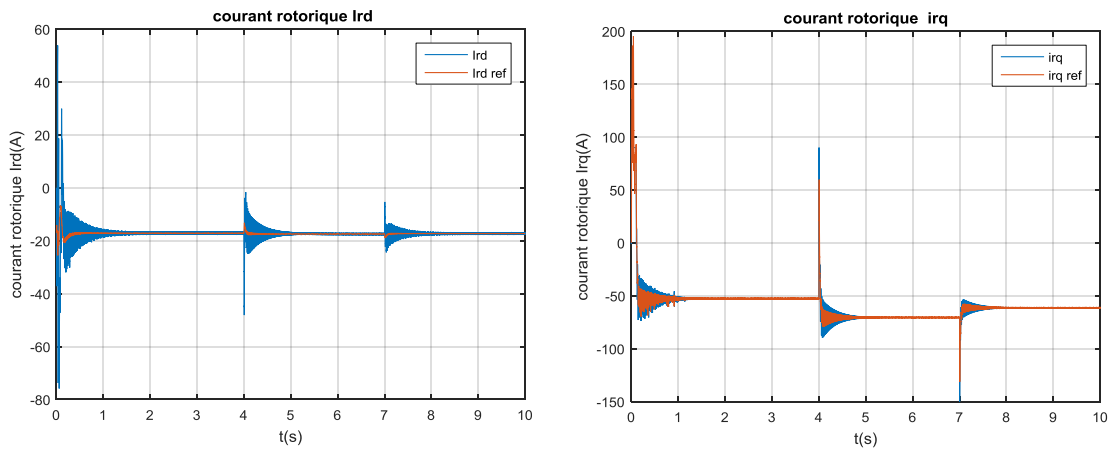
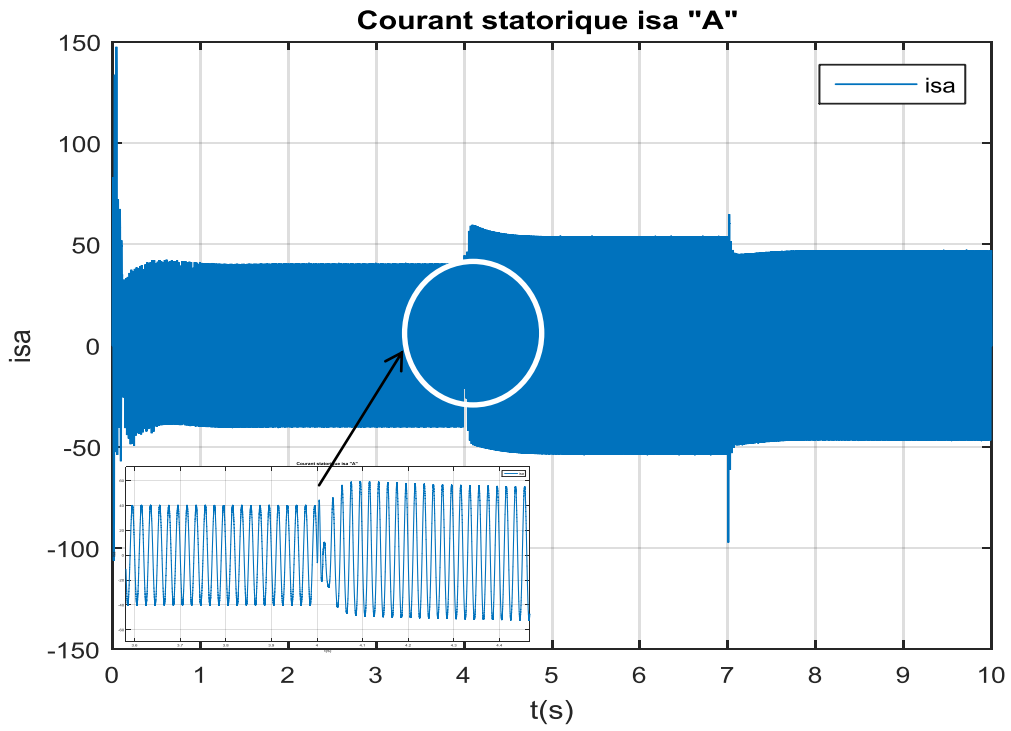
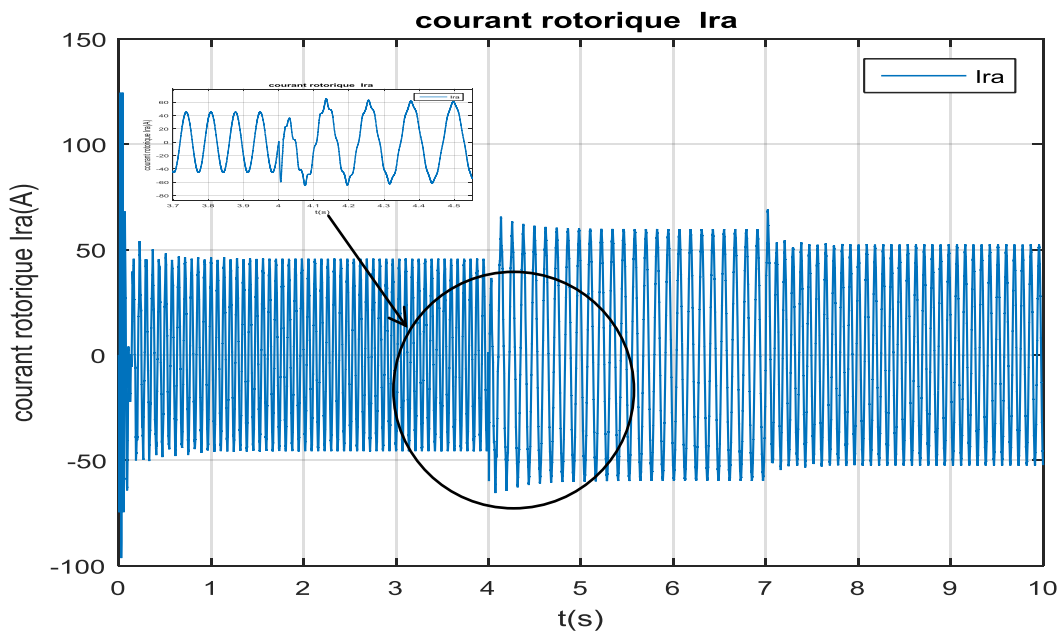


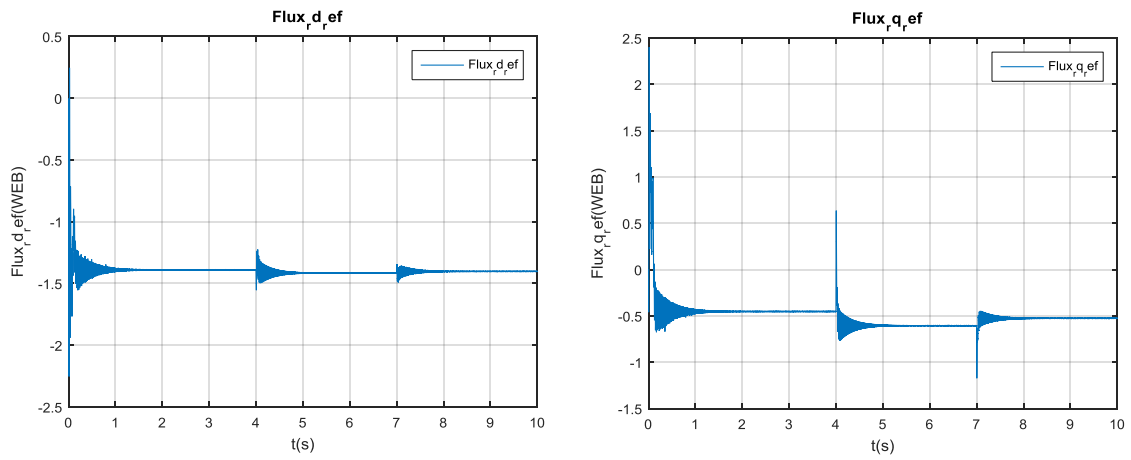
Figure 3.11. Courants rotoriques de Park et leurs références



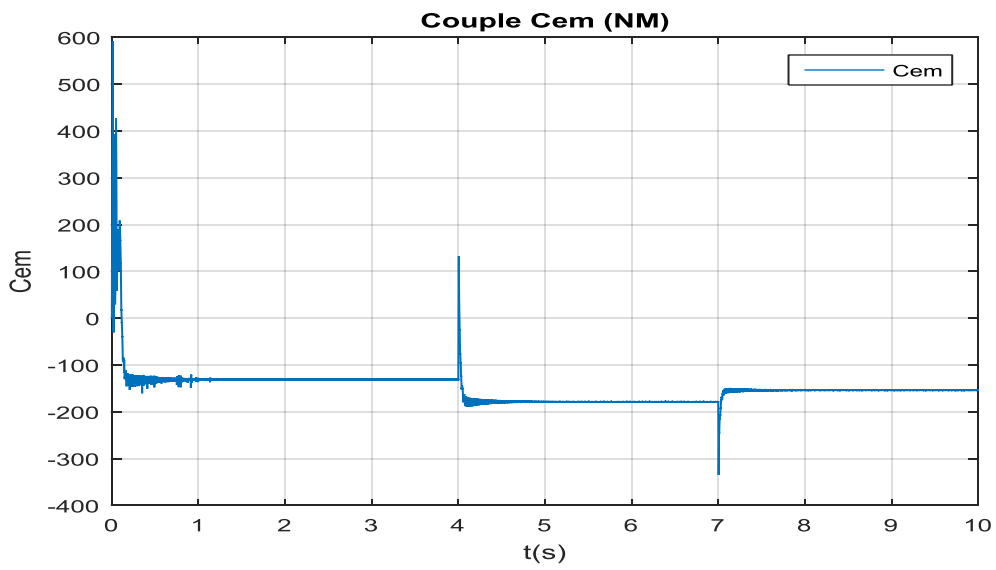
**Figure 3.12.** Courant statorique triphasé



**Figure 3.13.** Courant rotorique triphasé



**Figure 3.14.** Flux rotorique



**Figure 3.15.** Couple électromagnétique

### TEST DE ROBUSTESSE\_PI lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr

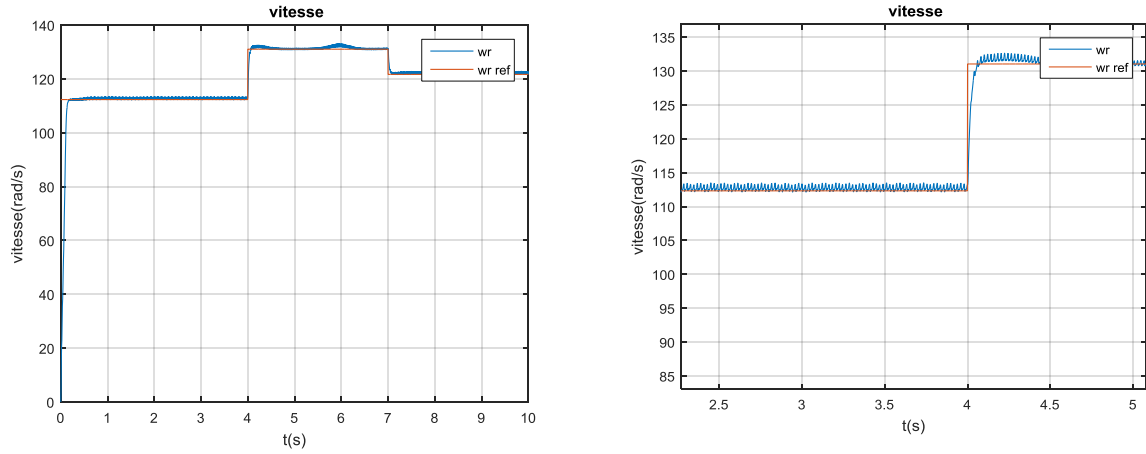


Figure 3.16 Vitesse de rotation de DFIG avec variation de la vitesse du vent lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr

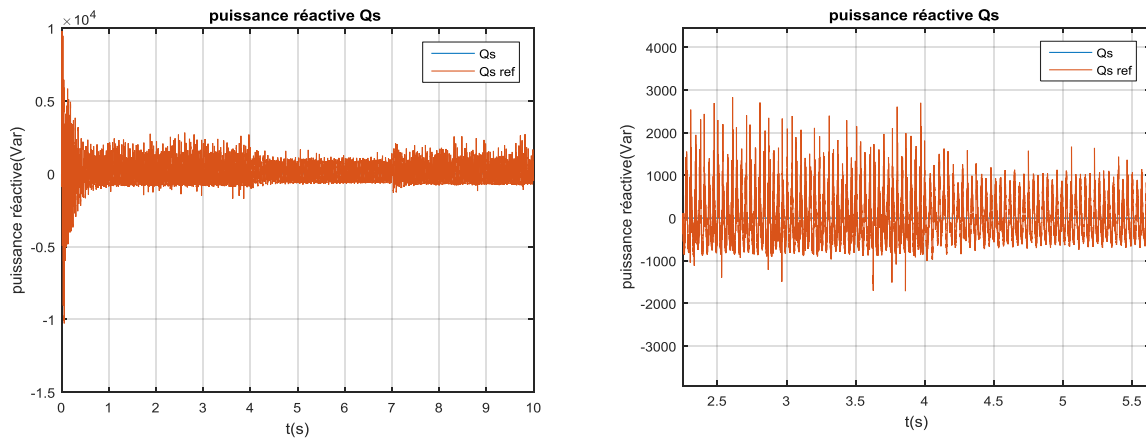
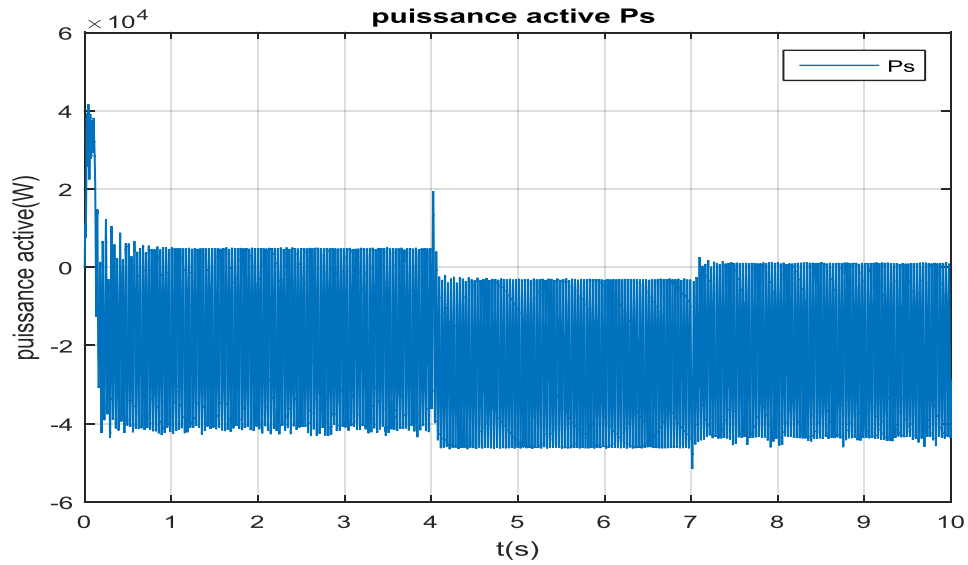
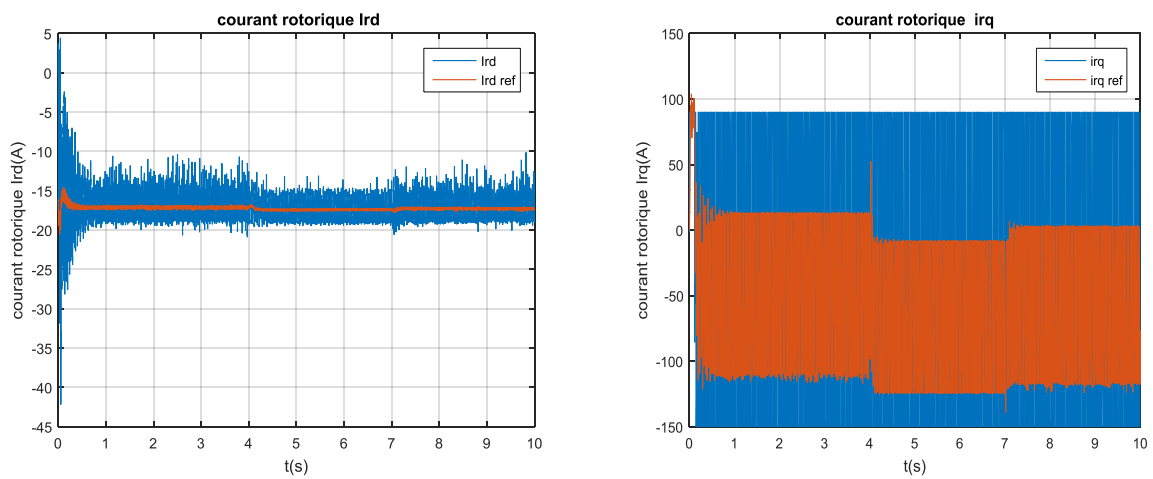


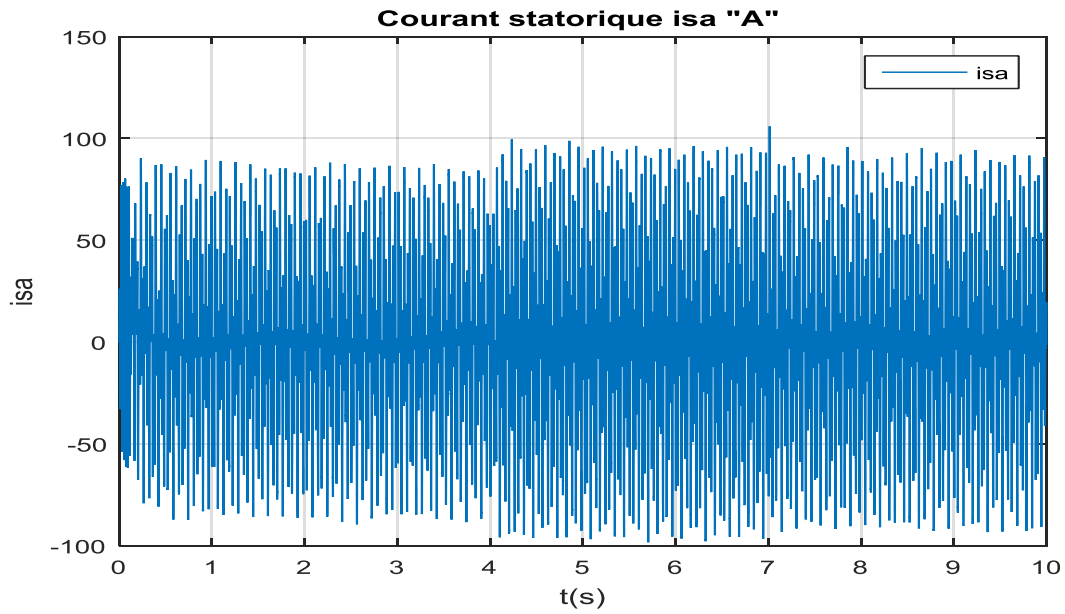
Figure 3.17 Puissance réactive statorique avec variation de la vitesse du vent lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr



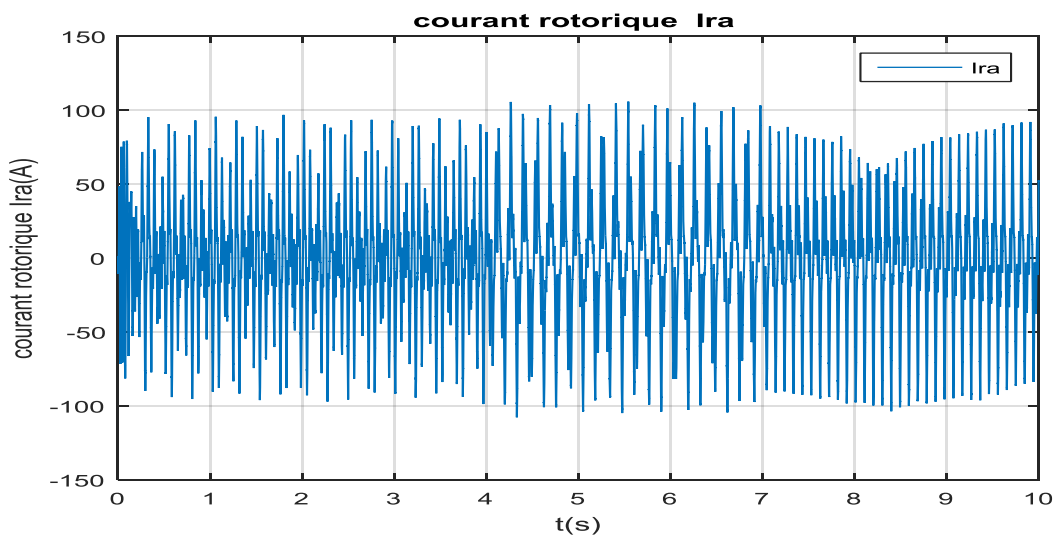
**Figure 3.18.** La puissance active statorique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



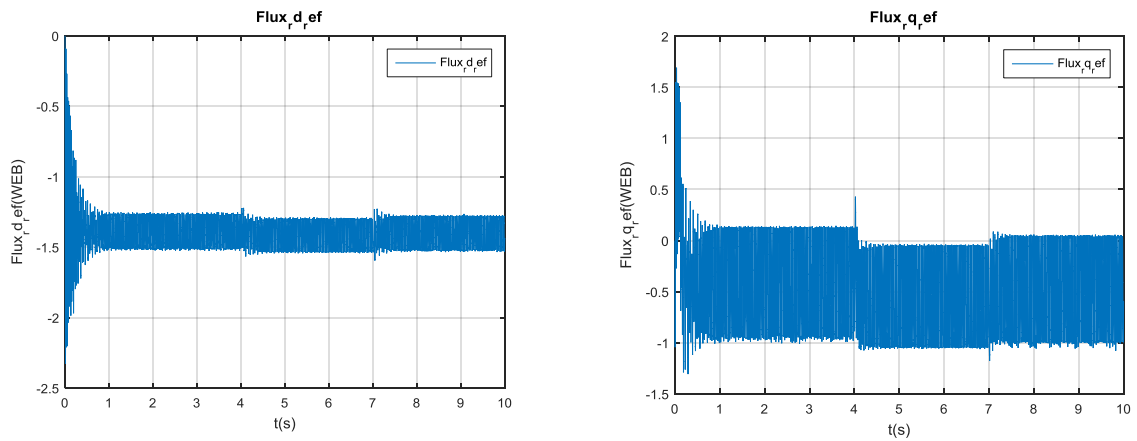
**Figure 3.19.** Courants rotoriques de Park et leurs références lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



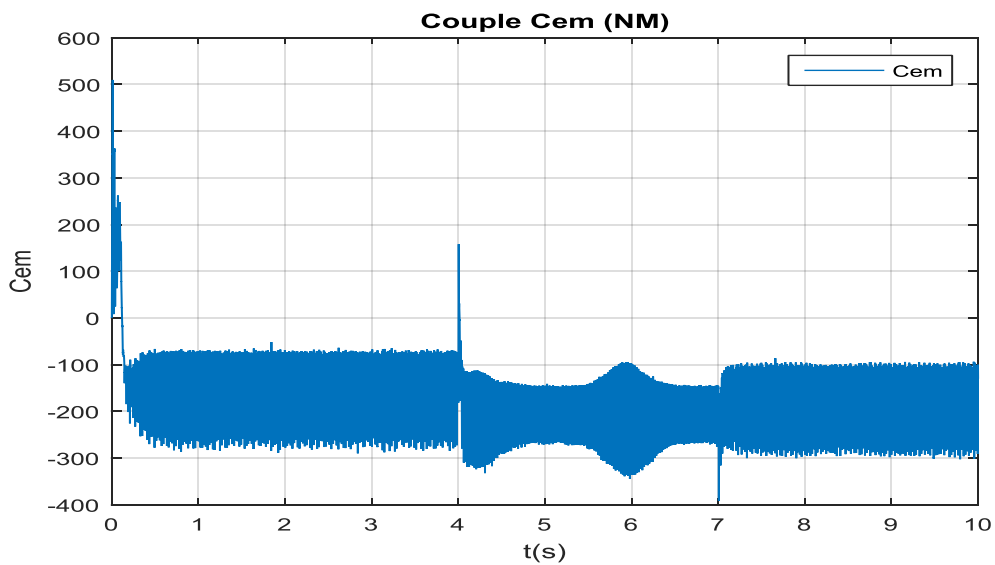
**Figure 3.20.** Courant statorique triphasé lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 3.21.** Courant rotorique triphasé lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 3.22.** Flux rotorique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 3.23.** Couple électromagnétique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$

### 3.6 Conclusion

Par orientation du flux statorique, nous avons développé la commande vectorielle de la GADA avec contrôle de la puissance réactive et réglage de la vitesse de rotation. Nous avons adopté des régulateurs de type classique (PI et IP).



Ces derniers dépendent fortement des paramètres de la MADA, et une erreur d'identification des paramètres conduira à une détérioration de performances de commande.

Vu cet inconvénient majeur, la régulation par un **régulateur GPC** qui s'introduit dans le cadre des régulateurs non linéaire, sera introduite au prochain chapitre comme une éventuelle solution à cet inconvénient.

# Chapitre 4    COMMANDE PREDICTIVE GENELALISEE

## D'UNE MADA

---

### 4.1 Introduction

L'un des objectifs essentiels dans le pilotage d'un système est l'élaboration d'une commande qui en présence de perturbation, permet de réduire la variance de la sortie autour de la trajectoire de la consigne.

L'algorithme de la commande prédictive a pour but tout d'abord de préciser les grandes idées communes aux méthodes prédictives, ou d'étendre cette présentation à des algorithmes prédictives plus évolués puis, dans le cas particulier l'algorithme de la commande prédictive généralisée (GPC en terme anglo-saxon, Generalized Prédictive Control), qui en intéresse pour la structure cascade pour la commande de position d'un machine asynchrone triphasé.

En effet, la sortie d'un système n'est plus prédite à un instant proche du retard mais a des instants futurs relatifs à un certain intervalle choisi.

L'objectif de cette loi consiste à prendre en compte, à l'instant présent, le comportement futur, en utilisant explicitement un modèle numérique du système, afin de prédire, la sortie du système dans le futur sur un horizon fini.

Cependant, il n'existe pas une stratégie unique, mais plutôt tout un ensemble de méthodes de commande prédictive, assez similaire, bâtie autour d'un principe connu, mais présentant néanmoins quelques différences dans l'interprétation des concepts clés.

La Commande Prédictive repose sur des idées relativement anciennes et intuitives, mais n'a connu un réel essor tant que technique de commande avancée que depuis le milieu des années 80. Cet essor s'est réalisé principalement selon deux axes privilégiés: [19]

- Commande Prédictive Généralisée (G.P.C.) de D.W.Clark: [Cla88]
- Commande Prédictive Fonctionnelle (P.F.C.) de J.Richalet:

La mise en œuvre de ce concept nécessite la considération des points suivants :

-La définition d'un modèle numérique du système permettant de réaliser la prédiction du comportement futur du système. Ce modèle peut être obtenu par une discrétisation de la fonction de transfert continue du modèle (transformée en  $z$ ) ou par une identification préalable hors ligne du système. [8],

-Cette particularité permet de classer la commande prédictive dans la grande famille des commandes à base de modèles, dite 'MBC' (Model Based Control)

- L'élaboration d'une séquence de commandes futures est obtenue par minimisation d'une fonction de coût quadratique, sur un horizon fini.

Le but de la stratégie prédictive est de faire coïncider la sortie du processus avec la consigne dans le futur sur un horizon fini. Cependant, il n'existe pas une stratégie unique mais plutôt tout un ensemble de méthodes de commande prédictive.

Une de ces méthodes, appelée Commande Prédictive généralisée (GPC) à été proposée par Clark et son équipe en 1987. Cette technique qui utilise un modèle de représentation CARIMA, est basée sur la minimisation d'un critère quadratique au sens d'un horizon fini.

La commande prédictive s'avère une structure suffisamment complète proposée pour résoudre un problème très général, fournissant un système asservi stable pour un jeu de paramètres de réglage donné. [1],[2]

Cette stratégie permet de commander des processus à déphasage non minimal, avec des pôles instables, avec des temps morts, constants ou inconnus, ou avec un modèle d'ordre inconnu.

Elle a montré son efficacité et son succès dans des applications industrielles, même pour des systèmes à faible période d'échantillonnage. Les applications dans le domaine de la conduite des moteurs ont donné de bons résultats en termes de rapidité et de précision.

## 4.2 Principe de la commande prédictive

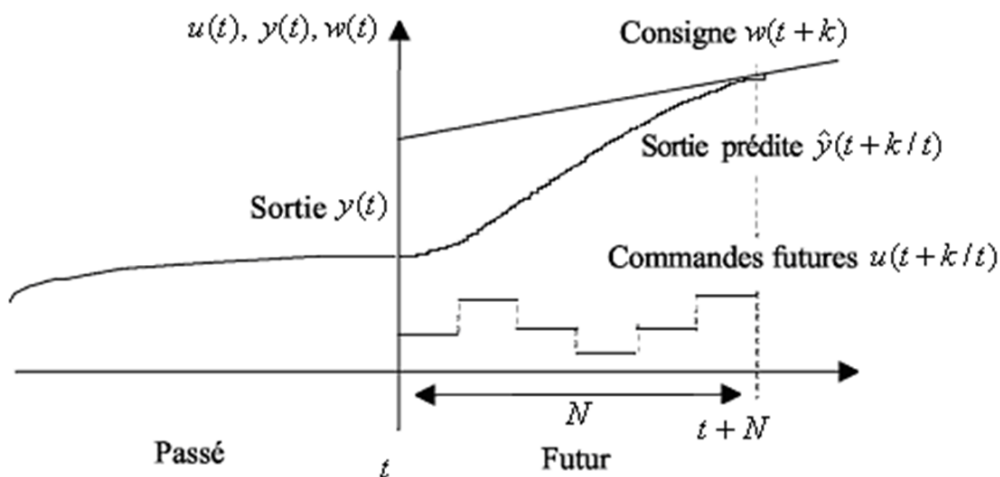
De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

1- Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote  $y(t + k / t)$ ,  $k = 0.....N$ , les sorties prédites et par  $N$

l'horizon de prédiction. Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps  $t$ .

2- Calculer la séquence de signaux de commande, dénoté par  $u(t+k/t)$ ,  $k=0, \dots, N-1$  en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence. On dénote par  $w(t+k/t)$ ,  $k=0, \dots, N$ , d'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre  $y(t+k/t)$  et  $w(t+k/t)$  et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande. Le signal de commande  $u(t/t)$  est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps  $t+1$  on acquiert la sortie réelle  $y(t+1)$  et on recommence au premier. [19].

La représentation temporelle est donnée par le schéma Figure (4.1) où l'on observe les commandes  $u(t+k/t)$  à appliquer au système pour obtenir le ralliement autour de la consigne  $w(t+k)$ . [5], [3]



**Figure 4.1.** Représentation temporelle du principe de la commande prédictive

### 4.3 Principe de fonctionnement du commande prédictive généralisée

La méthodologie est alors donnée par les cinq points suivants:

- Le modèle de prédiction utilise le modèle CARIMA, qui est une extension du modèle CARIMA, dans la mesure où il incorpore un effet intégral dans le but d'éliminer l'écart permanent et l'effet des perturbations constantes.

Le modèle numérique de prédiction est classiquement défini par une fonction de transfert.

- L'utilisation de la prédiction à horizon fini supérieur au retard et à la limite égale à l'ordre du système.

- La résolution récursive de l'équation de Diophantine.

- L'introduction de la pondération sur les incréments de commande dans le critère.

Le choix de l'horizon de commande à partir duquel tous les incréments sont pris égaux à zéro.

La combinaison de ces cinq concepts issus de plusieurs algorithmes a donné une méthode de commande puissante et performante très intéressante en pratique.

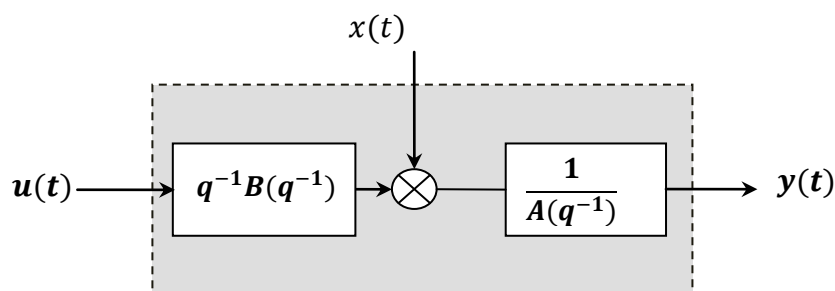
#### 4.4 Formulation du modèle de prédiction

Le modèle numérique de prédiction est classiquement défini par fonction de transfert entrée/sortie. Le système est alors représenté sous la forme **CARIMA** (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average), correspondant à la figure (4.2), dont l'expression est :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + x(t) \quad (4.1)$$

Tel que :

$$x(t) = C(q^{-1}) \frac{\xi(t)}{\Delta(q^{-1})} \quad (4.2)$$



**Figure 4.2.** Représentation CARIMA du modèle numérique

Avec  $u(t)$  l'entrée du système,  $y(t)$  la sortie,  $\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$  l'opérateur de différence  $\xi(t)$  modélise les perturbations par un bruit blanc centré,  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des polynômes en opérateur de retard  $q^{-1}$  :

$$\begin{cases} A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q^{-1}) = 1 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \\ C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \end{cases} \quad (4.3)$$

Ce modèle appelé aussi modèle incrémental, introduit une action intégrale par le terme  $\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$  et permet donc d'annuler toute erreur statique vis à vis d'une consigne ou d'une perturbation constante. On retiendra alors pour la suite cette dernière structure CARIMA, avec  $C(q^{-1})=1$  en ne s'intéressant qu'aux fonctions de transfert entrée/sortie pour lesquelles ce polynôme n'a aucune influence[29].

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta(q^{-1})} \quad (4.4)$$

## 4.5 Structure du prédicteur optimal

La sortie prédite estimée à l'instant  $t + j$ , est décomposée de façon classique en réponse libre et réponse forcée, permettant de séparer les contributions liées au présent et au passé des contributions futures, sous la forme :

$$y(t + j) = \underbrace{F_j(q^{-1})y(t) + H_j(q^{-1})\Delta u(t - 1)}_{\text{réponse libre}} + \underbrace{G_j(q^{-1})\Delta u(t + j - 1) + J_j(q^{-1})\xi(t + j)}_{\text{réponse forcée}} \quad (4.5)$$

Avec  $G_j$  représentant le futur,  $F_j, H_j$  correspondant au présent et au passé,  $J_j$  lié aux perturbations. Dès lors, le premier terme représentant la réponse libre est dû aux incréments de commandes passées, le deuxième terme représentant la réponse forcée correspond aux incréments de commandes futures et présentes, et à l'influence des perturbations.

L'équation du modèle CARIMA, équation (4.4), combinée avec celle du prédicteur, équation (4.5), fournit le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} A(q^{-1})\Delta(q^{-1})y(t + j) = B(q^{-1})\Delta u(t + j - 1) + \xi(t + j) \\ [1 - q^{-j}F_j(q^{-1})]y(t + j) = [G_j(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-1})]\Delta u(t + j - 1) + J_j(q^{-1})\xi(t + j) \end{cases} \quad (4.6)$$

Et par égalité entrée/sortie des fonctions de transfert sortie/bruit et commande/bruit, les polynômes inconnus  $F_j, G_j, H_j, J_j$ , sont solutions minimales uniques d'équation diophantienne :

$$\begin{cases} \Delta(q^{-1})A(q^{-1})J_j(q^{-1}) + q^{-j}F_j(q^{-1}) = 1 \\ G_j(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-1}) = B(q^{-1})J_j(q^{-1}) \end{cases} \quad (4.7)$$

En faisant l'hypothèse que la meilleure prédiction du terme lié aux perturbations est sa moyenne (ici nulle dans le cas du bruit blanc centré), le prédicteur optimal est défini de façon unique, dès que les polynômes sont connus, par la relation :

$$\hat{y}(t+j) = F_j(q^{-1})y(t) + G_j(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + H_j(q^{-1})\Delta u(t-1) \quad (4.8)$$

$$\text{Avec} \begin{cases} \text{degré de}[G_j(q^{-1})] = j - 1 \\ \text{degré de}[F_j(q^{-1})] = \text{degré de}[A(q^{-1})] \\ \text{degré de}[H_j(q^{-1})] = \text{degré de}[B(q^{-1})] - 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

L'implémentation de la commande prédictive généralisée nécessite la résolution des deux équations de diophantien (4.7).

#### 4.5.1 Prédicteur optimal sous forme matricielle

On considère les notations matricielles suivantes [29] :

$$\begin{cases} \mathbf{if} = [F_{N_1}(q^{-1}), \dots, F_{N_2}(q^{-1})]^T \\ \mathbf{ih} = [H_{N_1}(q^{-1}), \dots, H_{N_2}(q^{-1})]^T \\ \tilde{\mathbf{u}} = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N_u+1)]^T \\ \hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}(t+N_1), \dots, \hat{y}(t+N_2)]^T \end{cases} \quad (4.10)$$

Le prédicteur (4.9) peut alors être transcrit sous forme matricielle :

$$\hat{\mathbf{y}} = G\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{if}y(t) + \mathbf{ih}\Delta u(t-1) \quad (4.11)$$

Où  $G$  est la matrice formée des coefficients  $\{g_i^j\}$  des polynômes  $G_j$ . Ces coefficients correspondent aux valeurs des coefficients  $\{g_i\}$  de la réponse indicelle du modèle.

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1}^{N_1} & g_{N_1-1}^{N_1} & \dots & \dots \\ g_{N_1+1}^{N_1+1} & g_{N_1}^{N_1+1} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ g_{N_2}^{N_2} & g_{N_2-1}^{N_2} & \dots & g_{N_2-N_u+1}^{N_2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

### 4.5.2 Fonction de coût sous forme matricielle

De la même manière, le critère de coût se transcrit sous la forme [29] :

$$J = [\mathbf{G}\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{if}y(t) + \mathbf{ih}\Delta u(t-1) - \mathbf{w}]^T [\mathbf{G}\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{if}y(t) + \mathbf{ih}\Delta u(t-1) - \mathbf{w}] + \lambda \tilde{\mathbf{u}}^T \tilde{\mathbf{u}}$$

Avec :

$$\mathbf{w} = [w(t + N_1), \dots, w(t + N_2)]^T$$

### 4.5.3 Loi de commande optimale

La loi de commande optimale est obtenue par minimisation analytique du critère sous

forme matricielle  $\frac{\partial J}{\partial \tilde{\mathbf{u}}} = 0$  :

$$\tilde{\mathbf{u}}_{opt} = -\mathbf{M}[\mathbf{if}y(t) + \mathbf{ih}\Delta u(t-1) - \mathbf{w}] \quad (4.13)$$

Où

$$\mathbf{M} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I}_{N_u}]^{-1} \mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{N_u} \end{bmatrix}$$

### 4.5.4 Stratégie de l'horizon fuyant

De façon classique en commande prédictive, seule la première valeur de la séquence, équation (4.13), est finalement appliquée au système en accord avec la stratégie de l'horizon fuyant, l'ensemble de la procédure étant effectué de nouveau à la période d'échantillonnage suivante.

$$u_{opt}(t) = u_{opt}(t-1) - \mathbf{m}_1[\mathbf{if}y(t) + \mathbf{ih}\Delta u(t-1) - \mathbf{w}] \quad (4.14)$$

## 4.6 Structure RST du régulateur

La structure *RST* polynomiale est introduite afin d'obtenir une relation entre la sortie  $y(t)$ , la commande  $u(t)$  et la consigne  $w(t)$ . À partir de la relation (4.14), il vient :

$$\Delta u_{opt}(t)[1 + q^{-1} \mathbf{m}_1 \mathbf{ih}(q^{-1})] = -\mathbf{m}_1 \mathbf{if}(q^{-1})y(t) + \mathbf{m}_1 [q^{N_1} \dots q^{N_2}] \mathbf{w} \quad (4.15)$$



Cette relation doit correspondre d'après la figure (4.3) à l'équation :

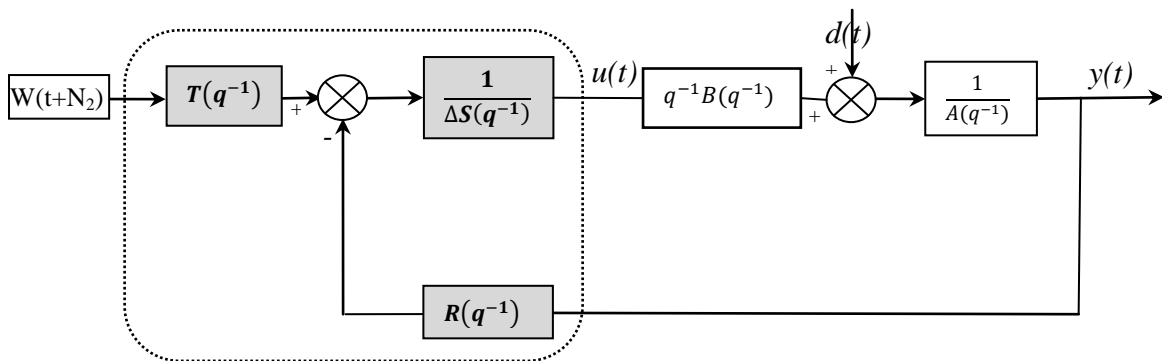
$$S(q^{-1})\Delta(q^{-1})u(t) = -R(q^{-1})y(t) + T(q)w(t) \quad (4.16)$$

Ce qui fournit par identification les trois polynômes  $R$ ,  $S$  et  $T$  constituant le régulateur linéaire équivalent :

$$\begin{cases} S(q^{-1}) = 1 + \mathbf{m}_1 \mathbf{i} h q^{-1} \\ R(q^{-1}) = \mathbf{m}_1 \mathbf{i} f \\ T(q^{-1}) = \mathbf{m}_1 [q^{-N_2+N_1} \quad q^{-N_2+N_1+1} \quad \dots \quad 1]^T \end{cases} \quad (4.17)$$

Avec

$$\begin{cases} \text{degré}[S(q^{-1})] = \text{degré}[B(q^{-1})] \\ \text{degré}[R(q^{-1})] = \text{degré}[A(q^{-1})] \\ \text{degré}[T(q^{-1})] = N_2 - N_1 \end{cases}$$



**Figure 4.3** Structure RST de la commande GPC

Notons que  $T$  est volontairement choisi ici causal (puissances de  $q^{-1}$ ), en considérant que le signal de consigne est  $w(t + N_2)$ .

L'intérêt qui se dégage de la représentation RST (par ailleurs très générale puisque toute loi de commande numérique peut se modéliser ainsi) est que finalement la boucle temps réel s'avère très peu gourmande en temps de calcul, puisque la commande appliquée au système se calcule par une simple équation aux différences (équation 4.16). Les trois polynômes  $R$ ,  $S$ ,  $T$  sont en effet élaborés hors ligne et définis de façon unique dès lors que les quatre

paramètres de réglage  $N_1, N_2, N_u, \lambda$  sont choisis. En conséquence, ce type de commande permet la sélection de périodes d'échantillonnage faibles et s'avère bien adapté à la commande de systèmes électromécaniques[29].

Un autre intérêt majeur de cette structure RST concerne l'étude de la stabilité de la boucle corrigée, et donc la caractérisation de la stabilité de la commande prédictive élaborée, qui est dès lors possible pour un jeu de paramètres du critère fixé. On peut vérifier la position des pôles en boucle fermée, donnés par l'équation caractéristique suivante:

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1})\Delta(q^{-1}) + q^{-1}B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (4.18)$$

Avec cette représentation, il est possible de tester la stabilité avant l'implantation de la loi de commande sur le système réel.

## 4.7 Algorithme de calcul de la GPC

Nous pouvons résumer la synthèse de la commande prédictive généralisée dans l'algorithme suivant :

Début

1. Obtention des coefficients  $A$  et  $B$  du modèle de processus de type CARIMA ;
2. Calcul du polynôme  $\tilde{A}=A\Delta$ ;
3. Définir les horizons de prédictions  $N_1$  et  $N_2$ , l'horizon de commande  $N_u$ , et le facteur de pondération  $\lambda$  ;
4. Résolution des deux équations de diophantien;
5. Formation de la matrice  $\mathbf{G}$  ;
6. Définition des matrices  $\mathbf{if}$  et  $\mathbf{ih}$  ;
7. Calcul de la matrice  $\mathbf{M} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I}_{N_u}]^{-1} \mathbf{G}^T$  ;
8. Calcul de  $\mathbf{m}_1$  (stratégie de l'horizon fuyant) ;
9. Synthèse du correcteur  $RST$

Fin

## 4.8 Choix des paramètres de réglage

On doit fixer quatre paramètres de réglage. Ce choix des paramètres s'avère cependant délicat, car il n'existe pas de relations empiriques permettant de relier ces paramètres à des 'indicateurs' classiques en Automatique, tel que la marge de stabilité. Nous énonçons ci-dessous quelques idées guidant le choix des paramètres de réglage [29].

#### 4.8.1 Choix de l'horizon minimal de prédiction $N_1$

Le produit  $N_1 T_e$  ( $T_e$  période d'échantillonnage) est choisi égal au retard pur du système. Ainsi, pour un système ne présentant pas de retard ou un retard mal connu ou variable,  $N_1$  est choisi égal à 1.

#### 4.8.2 Choix de l'horizon maximal de prédiction $N_2$

$N_2$  est choisi de sorte que le produit  $N_2 T_e$  soit limité par la valeur du temps de réponse souhaité. En effet augmenter la prédiction au delà du temps de réponse n'apporte aucune information supplémentaire et complexifie la résolution. Par ailleurs, plus  $N_2$  est grand, plus le système corrigé est stable et lent.

#### 4.8.3 Choix de l'horizon maximal de prédiction $N_u$

L'horizon de commande conditionne les dimensions des matrices et vecteurs impliqués pour le calcul de la loi de commande : plus ce paramètre est choisi petit plus le volume de calcul diminue. En plus si  $N_u = 1$ , ceci permet d'éviter des inversions de matrices lors des calculs de la loi de commande. D'où l'intérêt de choisir ce paramètre le plus petit possible (égal à un ou deux selon les performances exigées).

#### 4.8.4 Choix du facteur de pondération de la commande $\lambda$

On peut interpréter le facteur de pondération  $\lambda$  comme 'l'équilibre de la balance'. Plus  $\lambda$  est élevé et plus la commande optimale fournie est douce. Si  $\lambda$  est nulle, la minimisation du critère est effectuée sans tenir compte des mouvements de la commande. Il peut donc en résulter une commande très forte pouvant faire diverger le processus réel. Une relation permettant de déterminer rapidement la valeur de  $\lambda$  apportant au système le maximum de stabilité est donnée ci-dessous [29] :

$$\lambda_{opt} = \text{trace}(\mathbf{G}^T \mathbf{G}) \quad (4.19)$$

## 4.9 Application numérique sur la DFIG

Partant des trois des fonctions de transferts du modèle simplifié de la DFIG donné par les équations citées en troisième chapitre qu'on les rappelle ici :

$$G_i(S) = \frac{V_{dr}}{I_{dr}} = \frac{1}{R_r} \frac{1}{(1+\sigma\tau_r S)} \quad (4.20)$$

Avec:

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (4.20)$$

$$G_v(S) = \frac{\Omega}{I_{qr}} = \frac{K_e}{(f+JS)} \quad (4.21)$$

$$G_{Qs}(S) = \frac{Q_s}{I_{dr}} = \frac{L_m V_s}{L_s(R_r+L_r\sigma S)} \quad (4.22)$$

Prenant une période d'échantillonnage  $T_{ei} = 0.00009s$  On obtient les deux fonctions de transferts discrétisés correspondent aux précédent.

Respectivement.

$$G_i(q^{-1}) = \frac{0,01047}{1-0,9935q^{-1}} q^{-1} \quad (4.23)$$

## 4.10 Synthèse du régulateur GPC pour la boucle de courant

Selon (4.23) on obtient les polynômes  $A_i(q^{-1})$  et  $B_i(q^{-1})$  du model CARIMA suivants :

$$\begin{cases} A_i(q^{-1}) = 1 - 0.9935q^{-1} \\ B_i(q^{-1}) = 0.01047 \end{cases} \quad (4.24)$$

Le régulateur de courant est synthétisé pour le réglage suivant :  $N_1 = 1, N_2 = 11, N_u = 1$  et Les polynômes  $RST$  de la structure symbolisée dans la figure (4.3) deviennent :

$$S_i(q^{-1}) = 1 \Rightarrow \Delta S_i(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

$$R_i(q^{-1}) = 53.8701 - 47.4642q^{-1}$$

$$T_i(q^{-1}) = 1.0562 + 0.9633q^{-1} + 0.8697q^{-2} + 0.7756q^{-3} + 0.6808q^{-4} + 0.5855q^{-5} + 0.4895q^{-6} + 0.3928q^{-7} + 0.2956q^{-8} + 0.1977q^{-9} + 0.0992q^{-10}$$

## 4.11 Résultats de la simulation

Dans cette partie on présente les résultats obtenus des grandeurs de la DFIG en utilisant le logiciel MatlabSimulink avec la commande mixte (GPC, PI) du système éolien.

Les figures suivantes présentent les différents résultats obtenus.

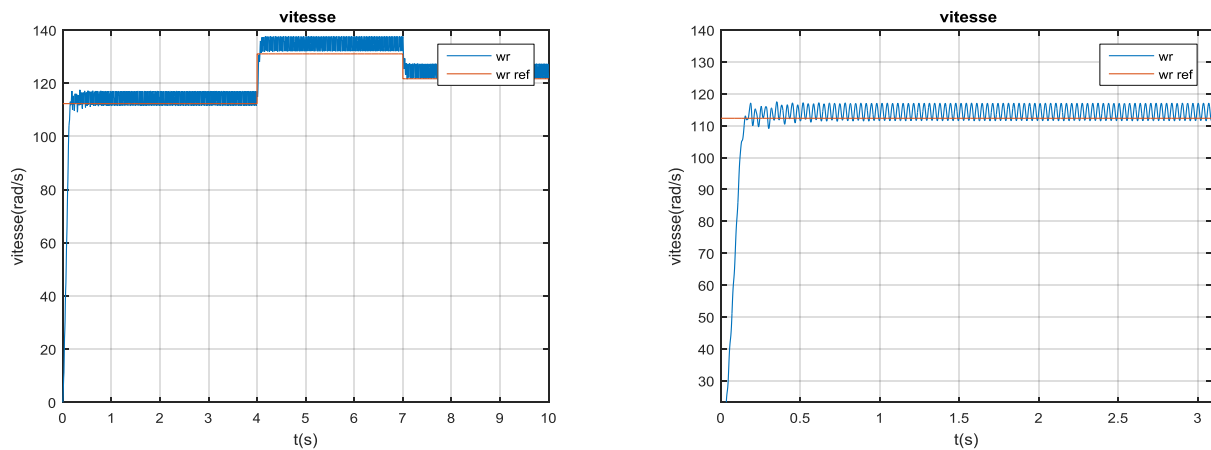


Figure 4.4 Vitesse de rotation de DFIG avec variation de la vitesse du vent.

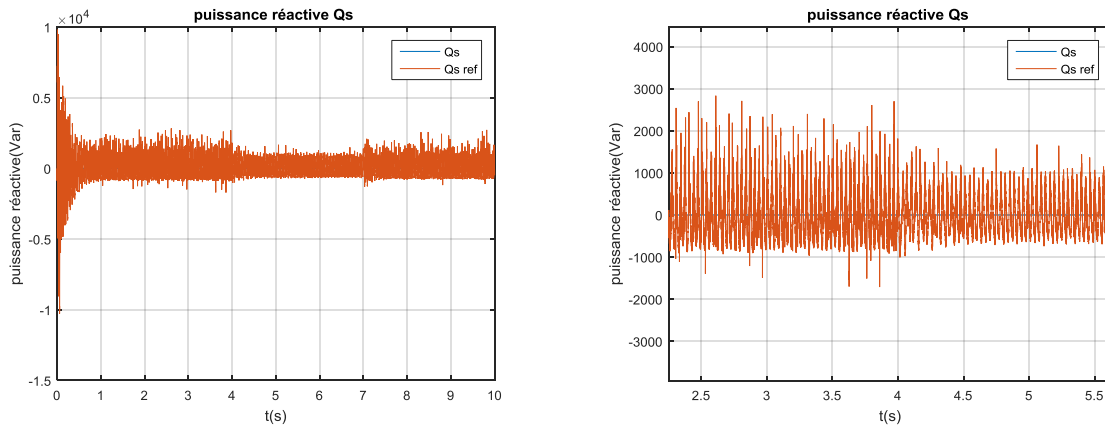


Figure 4.5 Puissance réactive statorique avec variation de la vitesse du vent

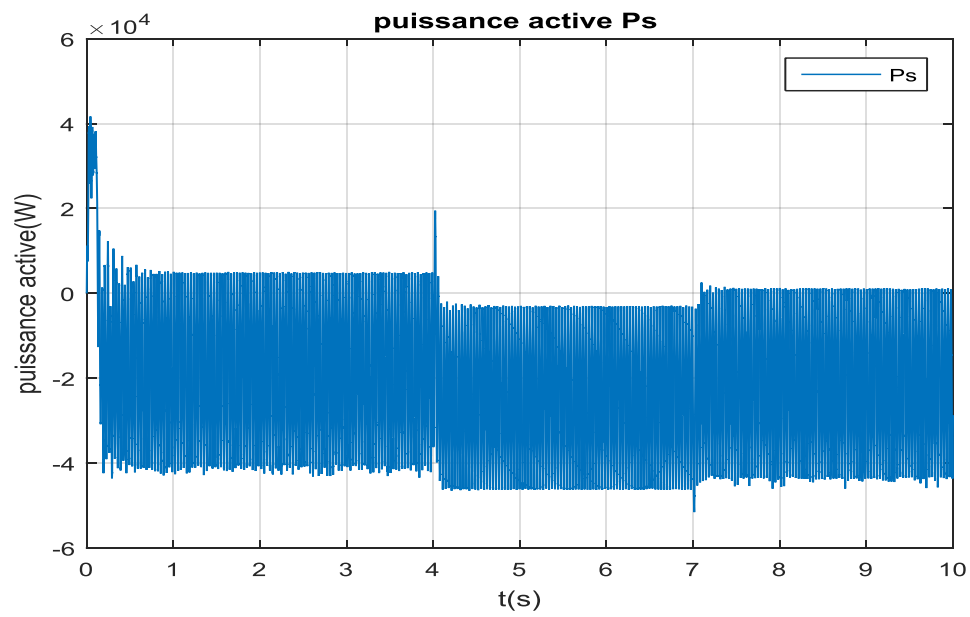


Figure 4.6. La puissance active statorique

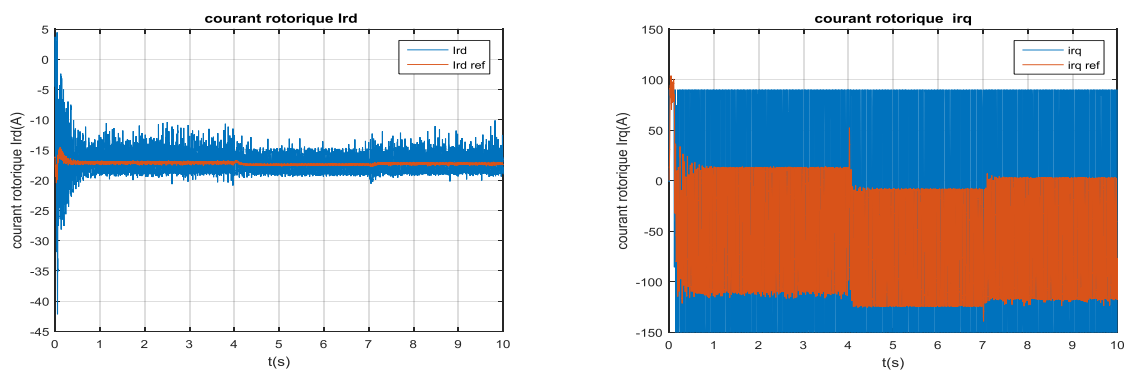


Figure 4.7. Courants rotoriques de Park et leurs références

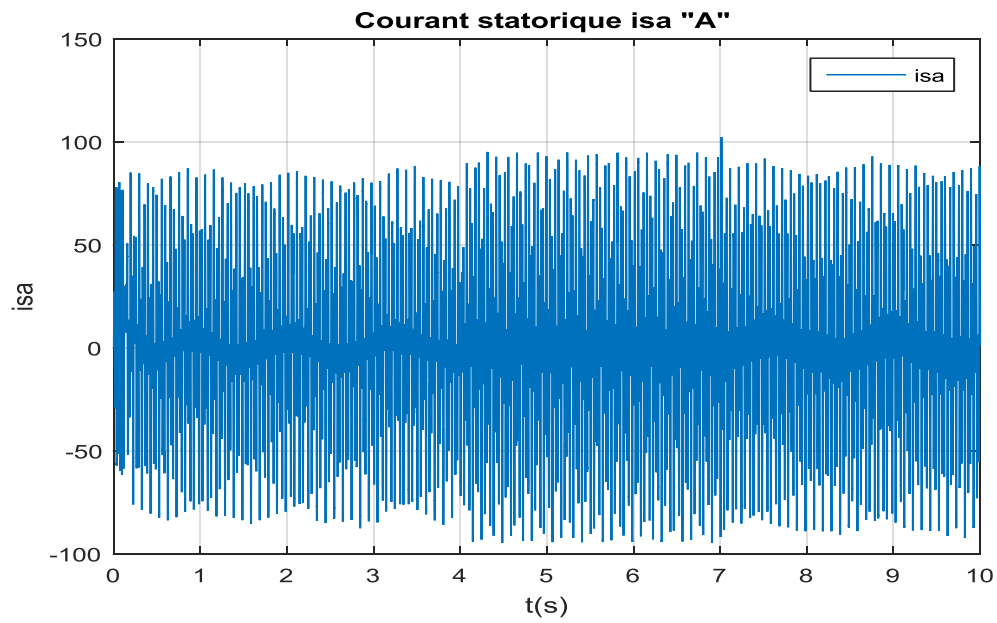


Figure 4.8. Courant statorique triphasé

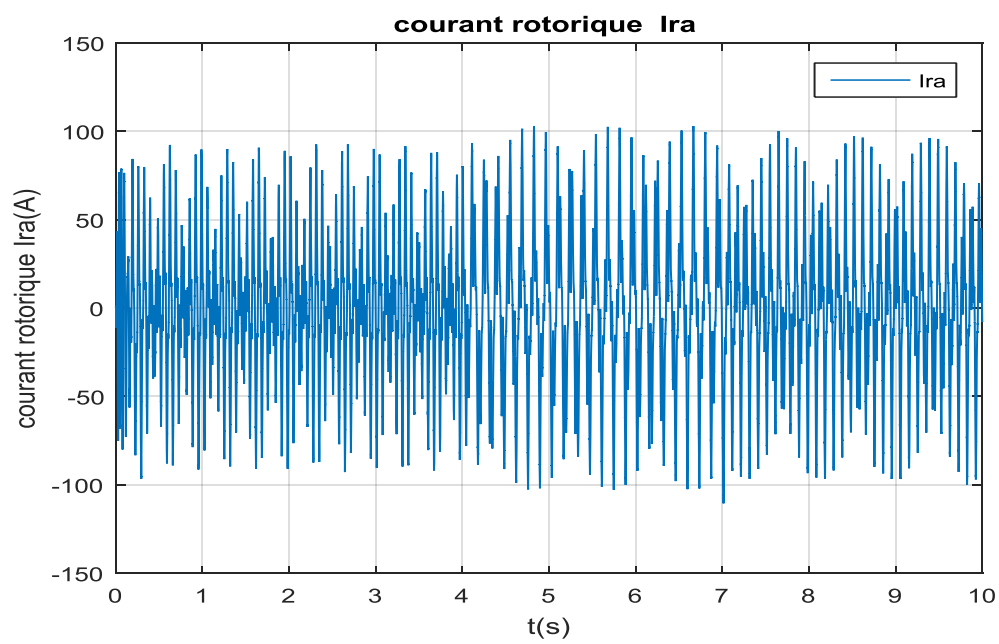


Figure 4.9. Courant rotorique triphasé

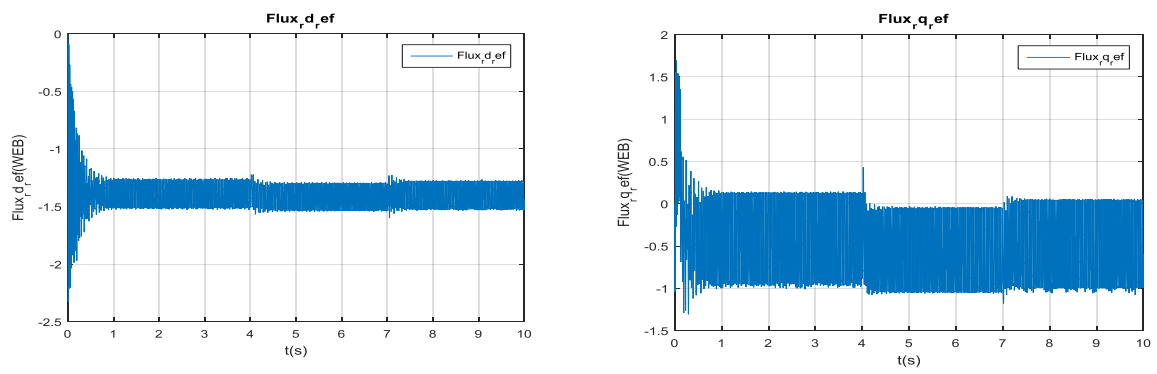


Figure 4.10. Flux rotorique

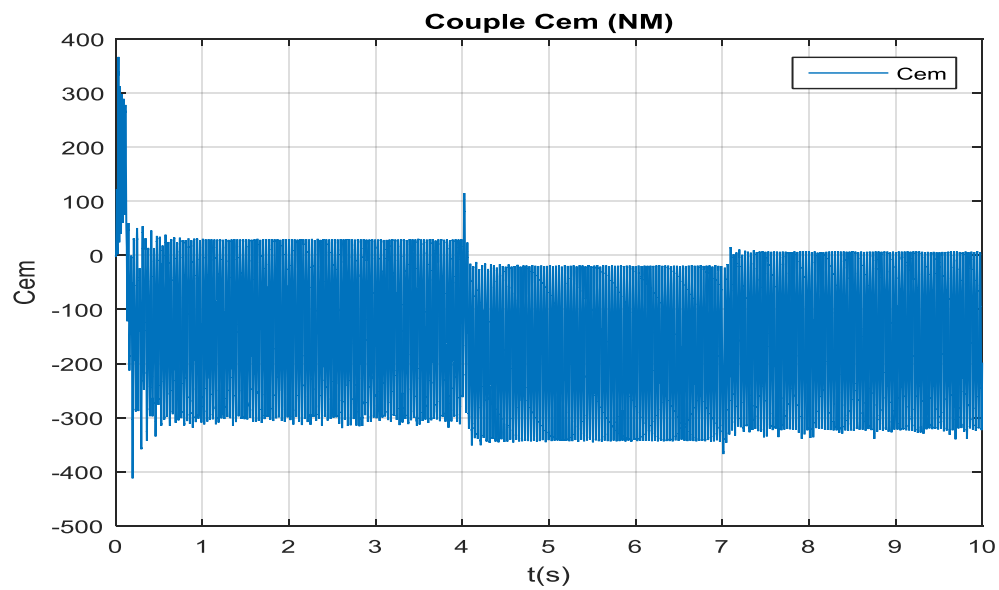


Figure 4.11. Couple électromagnétique



## TEST DE ROBUSTESSE\_GPC lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr

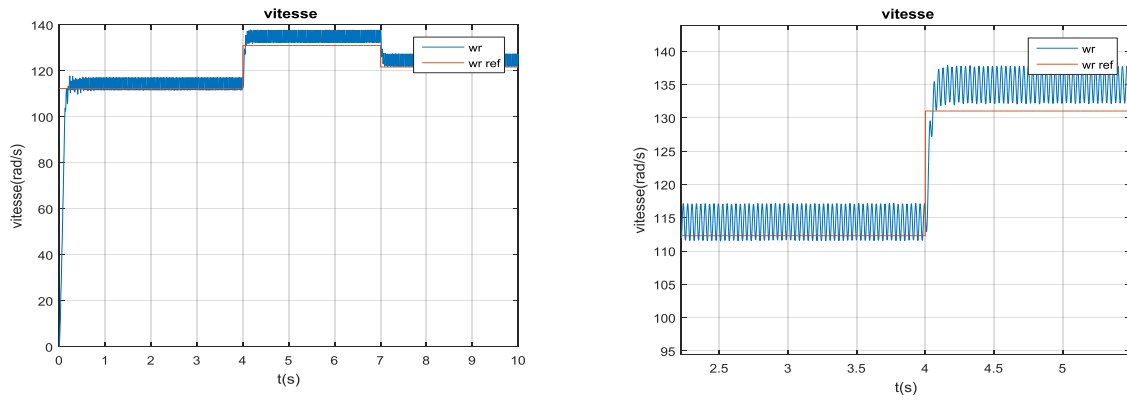


Figure 4.12 Vitesse de rotation de DFIG avec variation de la vitesse du vent lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr

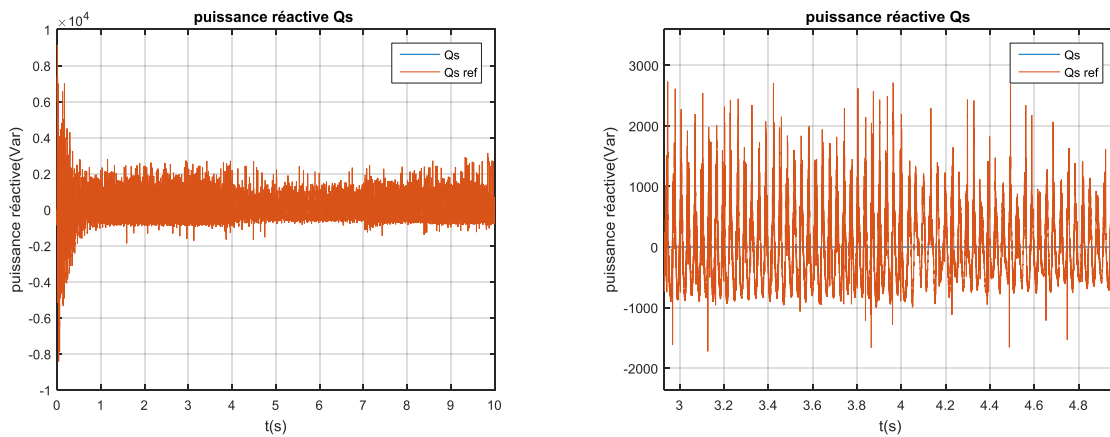


Figure 4.13 Puissance réactive statique avec variation de la vitesse du vent lors des variations de +50% du résistance rotorique Rr

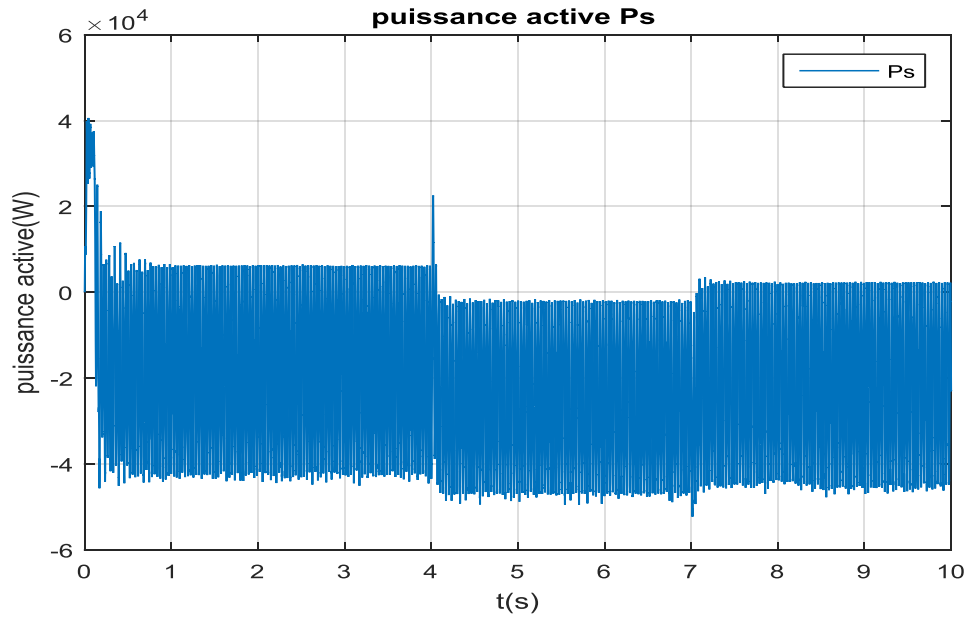


Figure 4.15. La puissance active statorique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$

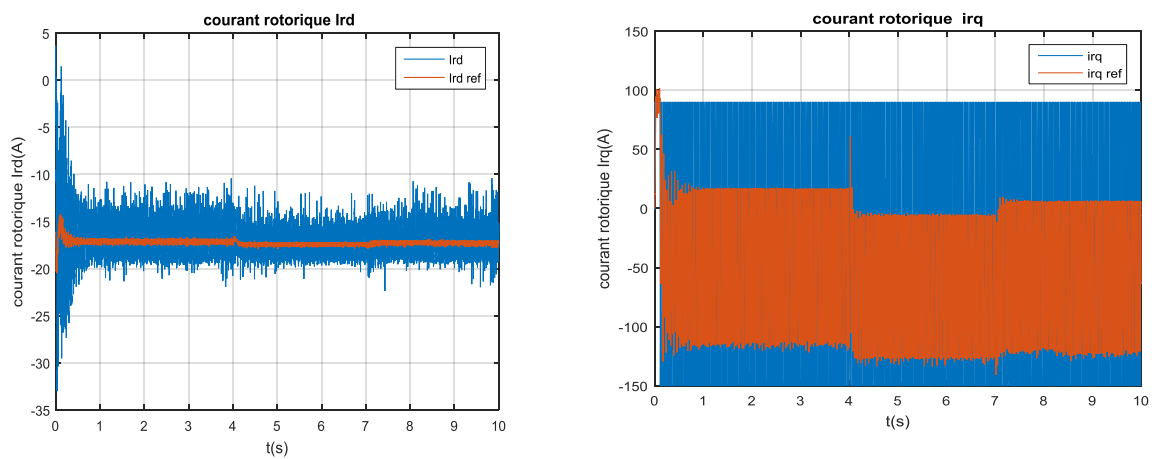
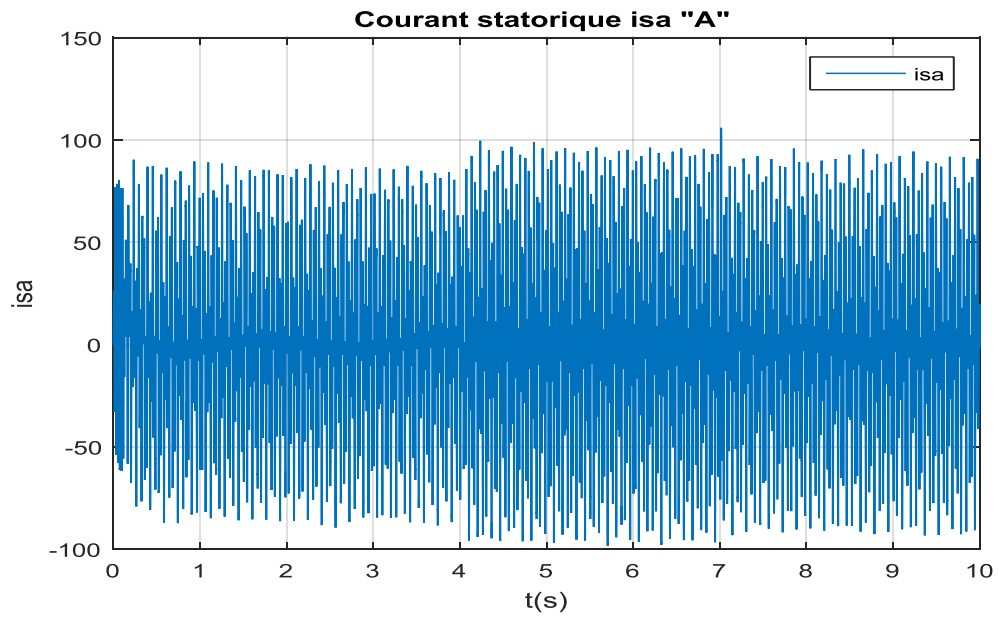
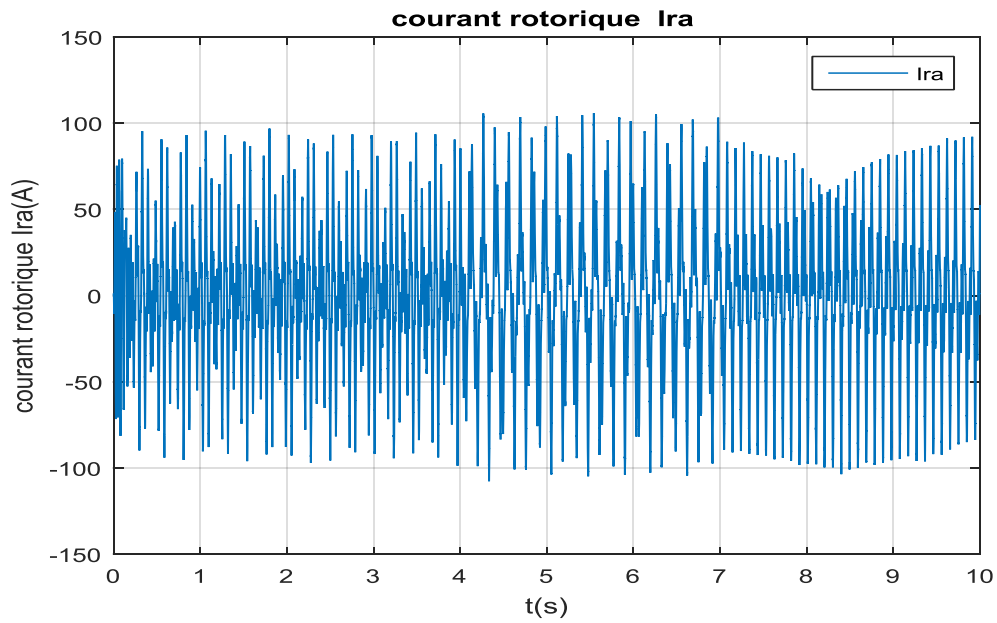


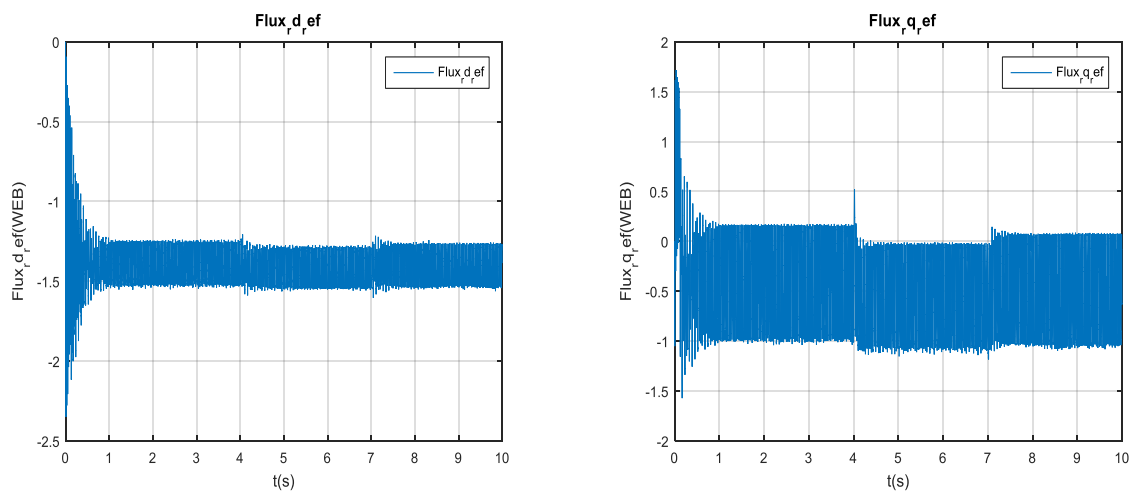
Figure 4.16. Courants rotoriques de Park et leurs références lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



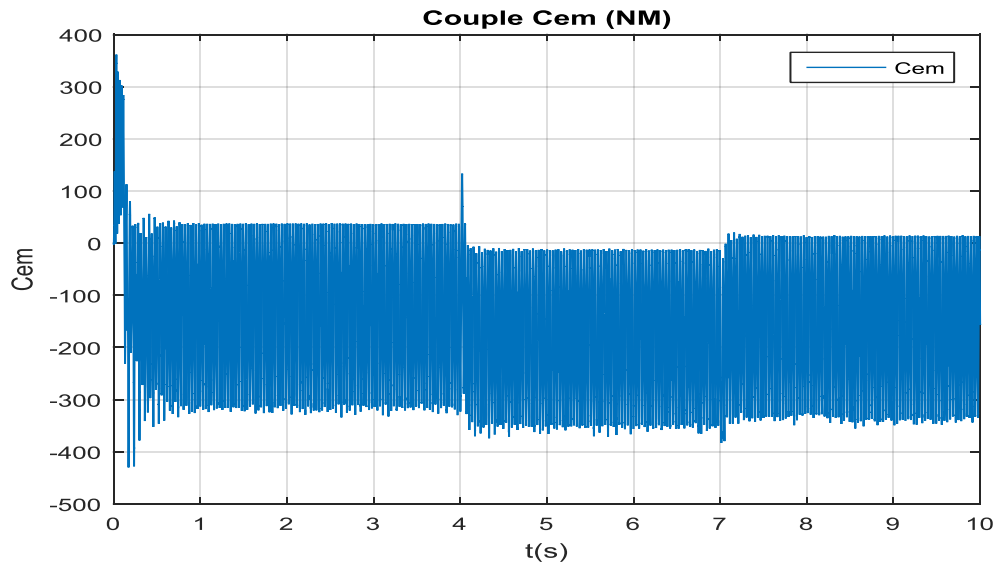
**Figure 4.17.** Courant statorique triphasé lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 4.18.** Courant rotorique triphasé lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 4.19.** Flux rotorique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$



**Figure 4.20.** Couple électromagnétique lors des variations de +50% du résistance rotorique  $R_r$

### Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la commande prédictive généralisée et les calculs du correcteurs GPC. Afin de formuler cette commande, une application numérique est faite sur la boucle interne du courants rotoriques.

Il est important de vérifier la robustesse de la loi de commande par rapport la variation paramétrique de  $R_r$ . Les figures (4.12), (4.13) , (4.14), (4.15), (4.16), (4.17),(4.18), (4.19), (4.20), montrent que de la variation du résistance rotorique par augmentation de 50% n'influe pas sur le comportement des grandeurs de la MADA ou les courbes sont parfaitement identiques et n'affecte pas la robustesse de la commande. .

## CONCLUSION GENERALE

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation intégré dans le système éolien. La première étape de la première partie a été consacrée à des généralités sur l'éolienne accompagnées d'un état de l'art sur la conversion électromécanique. Dans la deuxième partie Nous avons présenté la modélisation de la turbine éolienne, la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation et la modélisation de l'onduleur de tension piloté par la stratégie de commande à (MLI). La troisième partie a été consacrée à la commande vectorielle de DFIG par orientation de flux statorique avec contrôle de la puissance réactive et réglage de la vitesse de rotation de la DFIG. Dans la quatrième partie nous avons présenté l'application numérique sur la DFIG ; dont deux régulateurs linéaires ont été étudiés afin d'analyser leurs performances en terme de suivi de consigne, rejet de perturbations et de robustesse vis-à-vis des variations de paramètres : le régulateur PI qui a un rôle important en précision mais il est insuffisant pour le rejet des perturbations et le régulateur GPC qui s'est montré le plus efficace face à ce dernier (rejet des perturbations).

**Perspectives envisageables** : Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à compléter le travail réalisé ici ou d'ouvrir de nouveaux axes de travail sont envisageables.

Mais il n'est pas toujours facile de trouver des valeurs optimales pour ces paramètres.

Enfin on trouve que la commande GPC est robuste plus performante que la commande classique PI.

-Etudier d'autres types de stratégies et d'autres méthodes en zones 1, 3 et 4 du fonctionnement de l'éolienne.

---

-Etudier et synthétiser la commande de la MADA en utilisant le régulateur LQG (Linéaire Quadratique Gaussien) et faire la comparaison avec les deux régulateurs étudiés.

-Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique.

- Analyser l'effet du fonctionnement de la DFIG avec défaut sur le réseau auquel est connectée.

---

---

Paramètres utilisés :

**1. Valeurs nominales de la DFIG:** 7.5kW ; 220/380 V; 50 Hz ; 1500 tr/min

**2. Paramètres de la DFIG :**

Résistance du stator  $R_s = 0.455 \Omega$

Résistance du rotor  $R_r = 0.62 \Omega$

Inductance du stator  $L_s = 0.084 \text{ H}$

Inductance du rotor  $L_r = 0.081 \text{ H}$

Inductance mutuelle  $L_m = 0.078 \text{ H}$

Inertie du rotor  $J = 0.3125 \text{ Kg}m^2$

Coefficient de frottement  $f = 6.73 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot m \cdot s^{-1}$

**. Paramètres de la turbine éolienne de 10KW**

Nombre de pales = 3.

Longueur d'une pale R=3m

Gain du multiplicateur de vitesse G=5.4

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] D. W. Clarke, C., Mohtadi, P.S. Tuffs : « Generalized predictive control – part I The basic algorithm; Part II. Extention and interpretations.», *Automatica* 23(2), 137-160, 1987
- [2] D.W.Clarke : « Application of generalized predicrive control to industrial processes», *IEEE Control System magazine* , pp 49-66 , avril 1988.
- [3] p.p.Kanjilal : « Adaptive predictive and predictive control », *IEE Control engeningserie* 52, 1995.
- [4] F.Braun. « Recherche et Développement pour la Conception d'ASIC pour Commande de Machines Electriques ». *Lettre des Sciences Physiques* N° 42 Mars/Avril, 1998
- [5] Didier DUMUR : « contribution à analyses au développement d’algorithme de commande prédictive», *Supélec – Service Automatique – Gif sur Yvette Université Paris XI U.F.R. scientifique d’orsay* 20 Mars 2002.
- [6] Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne ». *Thèse de Doctorat de l’université de NANTE*, 2003.
- [7] H. Camblong, « *Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne Dans La Génération D'Electricité Par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable* », *Thèse de Doctorat Bordeaux* 2003.
- [8] « An adaptive Generalized Predictive Control of Time-Varying Delay System », *Proceeding of the third International Conference on Machine, Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004. 0-7803-8403-2/04/2004 IEEE*.
- [9] S. Drid, « *Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation* », *Thèse de doctorat, Université de Batna* 2005.



[10] **S.Elaimani** « *Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Centrale de Lille, 2005.

[11] **A.Yazidi, H. Henao, G. Capolino, D. Casadei, F. Filippetti** « *Double-Fed Three-Phase Induction Machine abc Model for Simulation and Control Purposes* » Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, Issue 2005, pages 2560-2565.

[12] **S. Laribi**, " *Synthèse des Méthodes de Diagnostic Appliquées à la Détection des Défauts dans les Machines Asynchrones* ". Thèse de Magister USTO, Oran 2005.

[13] A. Davigny. « *Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* ». Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.

[14] : L. Khettache, « *Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation* » thèse de magister, université de Batna, 2007.

[15] M. Siddo, *Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*. Thèse d'ingénieur en électrotechnique. Université El-Harrach, Algérie, 2007.

[16] N. Abu-Tabak. « *Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation* ». Thèse de doctorat de l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 2008.

[17] I. Hamzaoui, « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* », Mémoire de magister ENP Alger, 2008.

[18] K. Idjdarene, « *Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone* » JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.

[19] N. BOUMALHA « *Analyse et comparaison d'algorithmes de Commande prédictive : Application à la machine à induction* » .Mémoire de Magister, 2009

[20] T. Ghennam, E.M. Berkouk, B. François « *Modeling and control of a doubly fed induction generator (DFIG) based wind conversion system* », *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2009. POWERENG '09. ,

[21]F. Poitiers , T. Bouaouiche, M. Machmoum , « *Advanced control of a doubly-fed induction generator for windenergy conversion* » Electric Power Systems Research Volume 79, Issue 7, July 2009, Pages 1085-1096.

[22] S. Shao; E. Abdi,.;F. Barati, R. ;McMahon, «*Stator-Flux-Oriented Vector Control for Brushless Doubly Fed Induction Generator*» , *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10, OCTOBER 2009.

[23]L. Sun, M. Zengqiang, Y .Yang, W .Tao, T. Haifeng , « *Active power and reactive power regulation capacity study of DFIG wind turbine* », *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009. SUPERGEN '09. ,

[24]F.Boumaaraf, « *Commande intelligente d'une association convertisseur statique - machine asynchrone à double alimentation* » .Mémoire de magister Université de Batna 2009.

[25]B.ChittiBabu , K.B. Mohanty, «*Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems- Modeling & Simulation*» *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 1, February, 2010.

[26] X. Zheng ;D. Guo, « *Study on the Connection of DFIG to Grid Based on Double-vector PWM* », *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering 2010*.

[27] : A. Boyette, « *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* ».

[28] :B. Francois « *La turbine éolienne (Modélisation et commande)* ». Master (Recherche) Sciences et Technologies. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance : L2EP, Lille.

[29] KHELIFI OTMANE Khelifa « *Commande prédictive robuste, application à la machine asynchrone triphasée* ».Thèse de Doctorat,ENP,2016.

[30] Ministère de l'énergie et des mines, Algérie;  
<http://www.memalgeria.org/francais/index.php?page=enr>.