

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MOULOUD MAMMERRI de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique



# *Mémoire de fin d'études*

*En vue d'obtention du diplôme Master en Electrotechnique*

*Option : Machines Electriques*

## *THÈME*

*Etude de la conversion de  
l'énergie éolienne à base de la  
machine asynchrone à double  
alimentation (MADA)*

*Travail réalisé par :*

*GHEZALI Yacine*

*NAIT MOHAND Yacine*

*Proposé et dirigé par :*

*Mr. HADDAD Salah*

*Promotion 2011*

## Remerciement

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadreur : Monsieur HADDAD Salah professeur à l'université MOULOUD MAMERI de Tizi-Ouzou, pour sa rigueur scientifique et ses qualités humaines, ses conseils et ses critiques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté de lire, de critiquer et d'enrichir ce travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants et les étudiants qui nous ont aidés avec des explications et des éclaircissements très importants pour le bon déroulement de ce travail.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents, mon père « Larbi » qui ne cesse  
de m'encourager, ma mère « Nassera » symbole de  
sacrifice, sans eux je ne serais pas ce que je suis  
aujourd'hui.*

*A mes chères sœurs et frère « Samia, Dihia, Hamida,  
Mohamed Lamine »*

*A toute la famille*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A la mémoire de mes grands-parents « Mohamed,  
Fatma », ma tante « Baya ».*

*A la mémoire de mon grand-père « Ahmed »*

*Un an déjà il nous a quitté*

*Je ne l'oublierai jamais*

*GHEZALI Y*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
À ceux à qui je dois énormément et que je ne  
remercierais jamais assez : mes très chers parents.*

*À mes chers frères et sœurs  
À toute la famille  
À tous mes amis  
À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*N. YACINE*

**TABLES DES MATIERES****GLOSSAIRE****NOMENCLATURE****INTRODUCTION GENERALE..... 1****Chapitre I : généralité sur les systèmes éoliens****I.1 Principe de fonctionnement ..... 4****I.2 Principaux composants d'une éolienne ..... 4****I.3 Différents types d'éoliennes ..... 6****I.3.1 Eolienne à axe vertical ..... 6****I.3.1-a La trainée différentielle ..... 7****I.3.1-b La variation cyclique d'incidence ..... 8****I.3.2 Eolienne à axe horizontal..... 9****I.4 Conversion énergie cinétique-mécanique..... 10****I.4.1 Description d'une pale éolienne ..... 12****I.4.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne..... 13****I.4.2.1 Le système « pitch » ..... 14****I.4.2.2 Le système « stall » ..... 15****I.4.2.3 Le système « stall actif »..... 16****I.5 Chaîne de conversion électrique des éoliennes de grande puissance..... 17****I.5.1 Eolienne à vitesse fixe..... 17****I.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil ..... 17****I.5.1.2 Machine asynchrone à double stator ..... 19****I.5.2 Eolienne fonctionnant à vitesse variable ..... 20**

I.5.2.1 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance .....	22
I.5.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" .....	23
I.5.2.2-a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée .....	24
I.5.2.2-b Machine asynchrone à double alimentation-structure de Kramer .....	25
I.5.2.2-c Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI .....	26
I.5.2.3 Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants .....	27
I.5.3 Synthèse des différentes éoliennes .....	28
I.6 Conclusion.....	30
 <b>Chapitre II : Modélisation de la MADA</b>	
II.1 Equations électriques dans les axes a,b,c .....	32
II.2 Equations magnétiques .....	33
II.3 Equation mécanique de la machine.....	34
II.4 Modèle de la MADA dans le plan (dq) .....	34
II.4.1 La transformation de Park .....	34
II.4.2 Equations magnétiques dans les axes d et q.....	36
II.4.3 Equations électriques dans les axes d et q.....	37
II.4.4 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q .....	37
II.4.5 Choix du référentiel du travail.....	39
II.4.6 Mise sous forme d'équations d'états.....	40

---

II.5 Bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné .....	41
II.5.1 Bilan des puissances dans un générateur asynchrone à double alimentation en mode hypo-synchrone.....	43
II.5.2 Bilan des puissances dans un générateur asynchrone à double alimentation en mode hyper-synchrone .....	43
II.6 Conclusion .....	44
 <b>Chapitre III : Commande en puissance de la MADA</b>	
III.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté .....	45
III.2 Commande vectorielle de la MADA .....	46
III.2-a Procédé d'orientation du flux .....	46
III.2-b Orientation du flux statorique .....	47
III.2-c Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques .....	49
III.2-d Relation entre tension rotorique et courant rotorique .....	50
III.3 Régulation de puissance .....	52
III.3-a Mise en place de la régulation.....	52
III.3-b Synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI) .....	54
III.4 Analyse des performances .....	56
III.4.1 Suivi de consigne .....	56
III.4.2 Sensibilité aux perturbations .....	57
III.5 Interprétation des résultats.....	60
III.6 Conclusion.....	60

---

## **Chapitre IV : simulation du système global**

IV.1 Schéma synoptique du dispositif étudié.....	62
IV.2 Dispositif mécanique.....	62
IV.2-a Modèle aérodynamique.....	62
IV.2-b Modèle de la partie mécanique.....	64
IV-3 Dispositif de commande.....	66
IV.3.1 Extraction du maximum de la puissance du vent.....	66
IV.3.2 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.....	67
IV.3.3 Commande du convertisseur coté rotor (RSC).....	69
IV.4 Dispositif de puissance.....	69
IV.4.1 Association onduleur-MADA.....	69
IV.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	70
IV.5 Schéma de simulation.....	74
IV.6 Résultats de simulation.....	75
IV.7 Interprétation des résultats.....	77
IV.8 Conclusion.....	78
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>80</b>

### **Bibliographie**

### **ANNEXE I**

### **ANNEXE II**

CCM	Convertisseur Coté MADA
CCR	Convertisseur Coté Réseau
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GSC	Grid Side Converter
GTO	Gate Turn Off Transistor
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel Intégral
RSC	Rotor Side Converter

## Paramètres

$A$	surface balayée par l'hélice	$m^2$
$C_{pmax}$	valeur maximal du coefficient de puissance de la turbine	-
$f$	fréquence imposée par le réseau électrique	Hz
$f_c$	fréquence de commutation des interrupteurs de puissance	Hz
$f_v$	coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA	Nm.s/rad
$G$	gain du multiplicateur	-
$I_r$	valeur efficace des courants rotoriques de la MADA	A
$I_s$	valeur efficace des courants statoriques de la MADA	A
$J_m$	moment d'inertie de la MADA	kg.m <sup>2</sup>
$J_t$	moment d'inertie de la turbine	kg.m <sup>2</sup>
$K$	constante positive du couple de MCC	-
$K'$	constante positive de flux inducteur de MCC	-
$K_p$	gain proportionnel du contrôle des puissances statoriques	-
$K_i$	gain intégral du contrôle de la tension du bus continu	-
$M$	inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor	-
$M_{as}$	inductance mutuelle entre deux phases du stator	H
$M_{ar}$	inductance mutuelle entre deux phases du rotor	H
$M_{rs}$	inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor	H
$L_{as}$	inductance propre d'une phase statorique	H
$L_{ar}$	inductance propre d'une phase rotorique	H
$L_s$	inductance propre cyclique du stator	H
$L_r$	inductance propre cyclique du rotor	H
$L_m$	inductance magnétisante de la MADA	H
$p$	nombre de paires de pôles	-
$P_{min}$	puissance mécanique minimale de la turbine	W
$P_n$	puissance mécanique nominale de la turbine	W
$R$	longueur d'une pale	m
$R_r$	résistance du bobinage rotorique de la MADA	$\Omega$
$R_s$	résistance du bobinage statorique de la MADA	$\Omega$
$\tau_r$	temps de réponse du contrôle des puissances statoriques	s
$U_r$	valeur efficace des tensions composées rotoriques	V

$U_s$	valeur efficace des tensions composées statoriques	V
$v_d$	vitesse de vent minimale	m/s
$v_n$	vitesse de vent nominale	m/s
$v_{max}$	vitesse de vent maximale	m/s
$V_p$	valeur efficace de la porteuse triangulaire pour la MLI	V
$V_s$	valeur efficace des tensions simples statoriques	V
$\Phi_s$	valeur efficace du flux statorique de la MADA	Wb
$\lambda_{opt}$	valeur optimale de la vitesse relative	-
$\rho$	masse volumique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	coefficient de dispersion de la MADA	-
$\omega$	vitesse électrique de la MADA	rad/s
$\omega_s$	pulsation statorique de la MADA	rad/s
$\omega_r$	pulsation rotorique de la MADA	rad/s
$\Omega_{min}$	vitesse de rotation angulaire minimale de la turbine	rad/s
$\Omega_n$	vitesse de rotation angulaire nominale de la turbine	rad/s

## Variables

$C_{em}$	couple électromagnétique de la MADA	Nm
$C_k - C_{k+3}$	ordres de commande des interrupteurs du RSC ( $k = \{1, 2, 3\}$ )	-
$C_m$	couple mécanique de la MADA	Nm
$C_p$	coefficient de puissance de la turbine	-
$C_t$	couple mécanique de la turbine	Nm
$g$	glissement de la MADA	-
$i_{rk}$	courants rotoriques de la MADA ( $k = \{1, 2, 3\}$ )	A
$i_{rd}, i_{rq}$	courants rotoriques de la MADA dans le repère de Park	A
$i_{sk}$	courants statoriques de la MADA ( $k = \{1, 2, 3\}$ )	A
$i_{sd}, i_{sq}$	courants statoriques de la MADA dans le repère de Park	A
$N_m$	vitesse de rotation de la MADA	tr/min
$P_r$	puissance active rotorique de la MADA	W
$P_s$	puissance active statorique de la MADA	W
$P_t$	puissance mécanique de la turbine	W

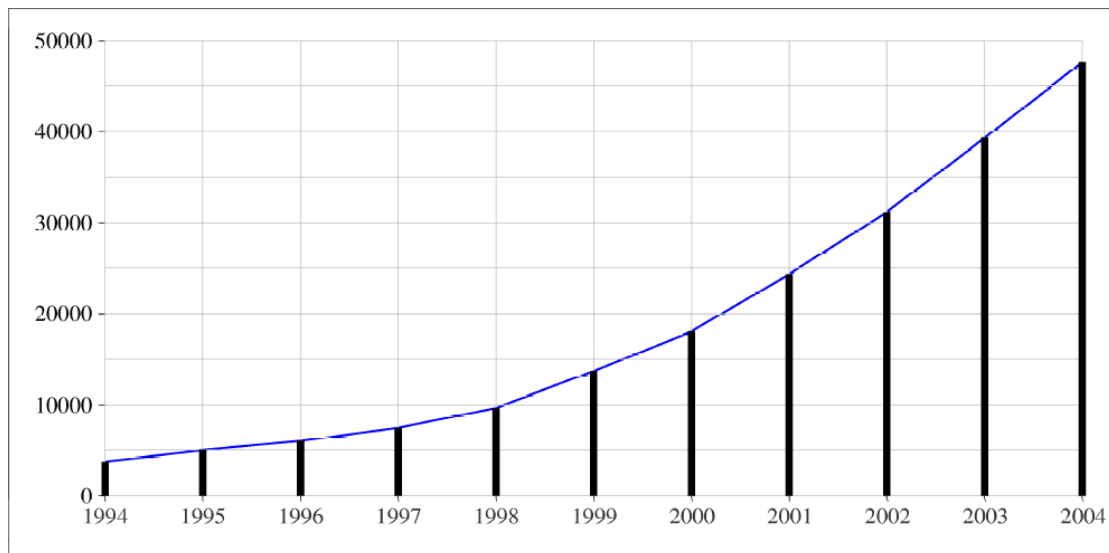
$Q_c$	puissance réactive des charges	Var
$Q_r$	puissance réactive rotorique de la MADA	Var
$Q_s$	puissance réactive statorique de la MADA	Var
$S_r$	puissance apparente rotorique de la MADA	VA
$S_s$	puissance apparente statorique de la MADA	VA
$v$	vitesse du vent	m/s
$v_{rk}$	tensions rotoriques triphasées de la MADA	V
$v_{rd}, v_{rq}$	tensions rotoriques de la MADA dans le repère de Park	V
$v_{sk}$	tensions statoriques triphasées de la MADA ( $k = \{1, 2, 3\}$ )	V
$v_{sd}, v_{sq}$	tensions statoriques de la MADA dans le repère de Park	V
$v_{dc}$	tension du bus continu	V
$\beta$	angle de calage des pales	°
$\lambda$	vitesse relative de la turbine	-
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	flux rotoriques de la MADA dans le repère de Park	Wb
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	flux statoriques de la MADA dans le repère de Park	Wb
$\theta_e$	angle électrique entre les bobinages rotorique et statorique	rad
$\theta_r$	angle de Park des grandeurs rotoriques	rad
$\theta_s$	angle de Park des grandeurs statoriques	rad
$\omega_r$	pulsation rotorique de la MADA	rad/s
$\Omega_m$	vitesse de rotation angulaire de la MADA	rad/s
$\Omega_t$	vitesse de rotation angulaire de la turbine	rad/s

## Introduction générale

Ce sont les danois qui à la fin du siècle dernier, ont utilisé les premiers le vent pour produire de l'électricité. Entre 1930 et 1960, la puissance des aérogénérateurs est passée de quelques dizaines de watts à 1MW. Une éclipse temporaire des recherches a duré quelques années. Entre 1980 et 1985, les pouvoirs publics de Californie ont subventionné les investissements par incitation fiscale. Les Danois Et les Allemands ont suivi à la fin des années 80. Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (figure 1), ceci est principalement dû à deux raisons :

\*produire une énergie propre

\*trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles



**Figure 1 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW**

La production de l'électricité par énergie éolienne dépend d'abord de la qualité des sites. Seule une étude préalable des données météorologiques locales et une longue période de mesures sur le terrain permettent d'apprécier l'intérêt réel d'un site envisagé pour la construction d'éoliennes, en termes d'exposition aux vents, de fréquence et de vitesse moyenne des vents. On estime que le taux de 30% de jours ventés dans l'année peut justifier un investissement dès lors que les vitesses moyennes annuelles sont suffisantes, plus de 7.5 m/s pour les bons sites. Au-dessous de 5 à 6 m/s, l'investissement n'apparaît pas justifié. [20]

Il est important de qualifier et de quantifier les impacts de cette énergie dispersée. De plus, l'arrivée récente de nouvelles normes imposées à la génération éolienne a bouleversé la donne, puisque, auparavant, les parcs éoliens n'avaient qu'une seule « contrainte » : produire quand il était possible de produire. Le plan de protection était fait de telle sorte qu'en cas de défaut le parc était déconnecté du réseau puis arrêté. Ceci impliquait pour l'opérateur de réseau de faire face à une absence de production de l'ordre de quelques minutes, le temps de redémarrer puis de reconnecter les éoliennes. Aujourd'hui, du fait de l'importance en terme de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à de nouvelles exigences techniques, comme pouvoir assurer la continuité de fourniture d'énergie électrique ou tout au moins être apte à reprendre cette fourniture dès la disparition d'un défaut. Il faut donc savoir que les génératrices éoliennes sont aujourd'hui techniquement capables de répondre à ce cahier des charges.

Les éoliennes utilisent principalement deux types de générateurs d'énergie électrique :

- la machine synchrone ou l'alternateur (à rotor bobiné ou à aimants permanents).
- La machine asynchrone (à cage, à rotor bobiné ou à double alimentation MADA).

Le choix du générateur dépend de l'application considérée (puissance à installer, vitesse fixe ou variable, connexion directe ou indirecte au réseau, ...etc).

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un dispositif de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Il s'agit d'un système travaillant à vitesse variable et permettant d'extraire à chaque instant le maximum de la puissance offerte par le vent. Le travail qui nous est confié est de modéliser le dispositif complet puis d'étudier des stratégies de commande en puissance permettant à la fois de produire le maximum de puissance active possible et d'assurer un facteur de puissance unitaire.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre (généralités sur les systèmes éoliens), présente une description du système éolien à travers des équations et des concepts physiques régissant son fonctionnement suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés, ceci nous permet de nous positionner quant aux choix du type de génératrice et de technicités utilisées pour l'éolienne.

- Le deuxième chapitre (modélisation de la MADA), traite la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné en se basant sur les équations électriques, magnétiques et du couple à l'aide de la transformation de Park en vue d'une commande vectorielle. Une présentation du bilan des puissances est effectuée en mettant en évidence les deux régimes de fonctionnements hypo et hyper synchrone.
- Le troisième chapitre (commande en puissance de la MADA) est consacré à la modélisation de la commande vectorielle dans un repère lié au champ tournant statorique de la MADA en vue de l'introduction d'une stratégie de commande en puissance active et réactive statorique basée sur le régulateur (PI).
- Le quatrième chapitre (simulation du système global), consiste en la modélisation des autres éléments constituant le dispositif de production éolienne à savoir le dispositif mécanique, la recherche du MPPT et l'onduleur de tension à MLI associé au rotor de la MADA ainsi que sa stratégie de commande, il s'achève par une analyse des résultats de simulation du système pour un profil de vent passant par les deux régimes de fonctionnements (modes hypo et hyper synchrone) sans tenir compte de l'onduleur.
- Une conclusion générale synthétisera les principaux résultats obtenus et proposera quelques éventuelles études en perspective.

# CHAPITRE I

Ce chapitre présente les principales composantes d'un générateur éolien. Il débute par les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent, pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie par la turbine. Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de cette puissance sont ensuite brièvement exposées. Il introduit ensuite les différentes structures d'aérogénérateurs présents sur le marché et donne pour chacun des éléments de comparaison en listant les principaux avantages et inconvénients.

## I.1 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

\*Au niveau de la *turbine (rotor)*, 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. [3]

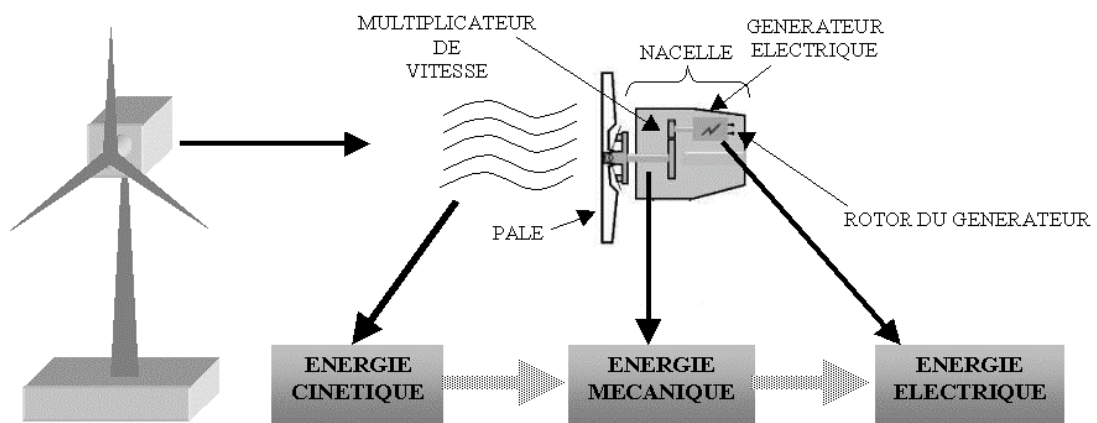
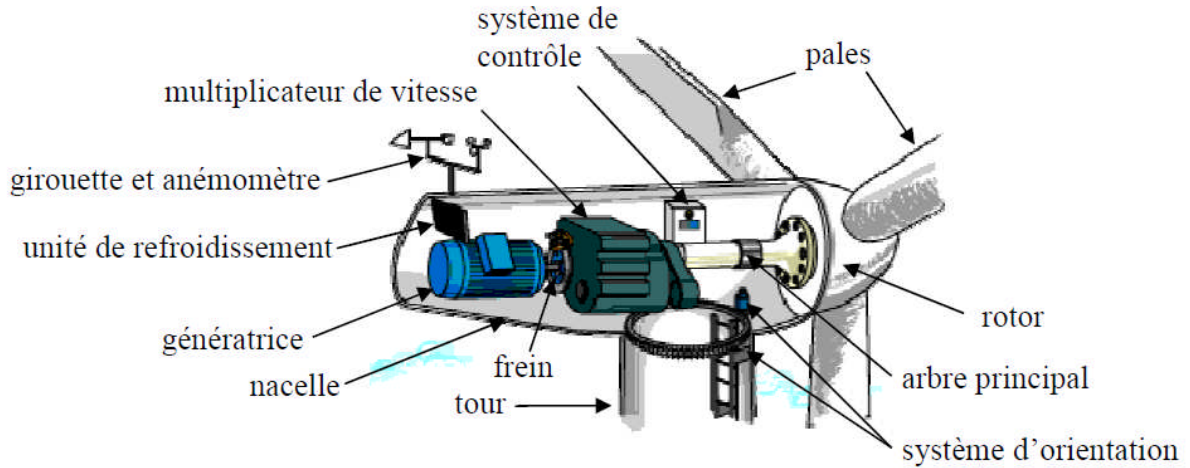


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

## I.2 Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure (I.2).



**Figure I.2 : Principaux composants d'une éolienne**

1. Le **mât (tour)**, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle plus rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 120 m). Si les éoliennes sont-elles si haut perchées, c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor. [4]

2. Un **rotor**, composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne (moyeu). Les pâles sont faites de bois ou de fibres de verre, leur rayon peut atteindre 75 m. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor. [4]

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

3. Une **nacelle** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. [4]

4. Un *arbre principal* qui tourne lentement et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur.
5. Le *multiplicateur de vitesse* constitué d'un grand nombre de roues dentées et placées dans un engrenage. Celui-ci transforme la force lente de l'arbre principal en rotation rapide pour la génératrice.
6. Un *frein* mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
7. La *génératrice* qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
8. Une *girouette* qui informe le système de contrôle de la direction du vent.
9. L'*anémomètre* qui mesure la vitesse du vent et informe le système de commande quand le vent souffle assez fort pour produire de l'électricité de manière efficace.
10. Un *système de contrôle* chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par l'anémomètre (vitesse du vent) et la girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. [4]
11. Une *unité de refroidissement* qui fonctionne comme un ventilateur ou un radiateur d'eau ou d'huile.
12. Une *fondation* pour empêcher l'éolienne de basculer par grands vents.

### **I.3 Différents types d'éoliennes :**

#### **I.3.1 Eolienne à axe vertical :**

Elles ont été les premières structures développées pour la production de l'énergie électrique, elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Leurs organes de commande et le générateur se situent au niveau du sol donc facilement accessible. Il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor, cependant elles ne peuvent pas démarrer automatiquement il faut les lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. [2]

Elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grande distance et les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales cela présente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole. La conception verticale impose que les éoliennes fonctionnent avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur, et en raison de leur petite taille l'énergie produite reste faible. Ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont limité le développement de ces éoliennes laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal. [2]



Rotor de Savonius



Rotor de Darrieus

**Figure I.3 : Eolienne à axe vertical**

Deux principes différents sont utilisés pour ce type d'éoliennes à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

### **I.3.1-a La traînée différentielle :**

Le fonctionnement de ce type de machines est basé sur : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble, et la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres augmente le couple moteur, l'illustration de ce genre d'éolienne est le rotor de Savonius (un ingénieur finlandais qui l'a breveté en 1925). [5]

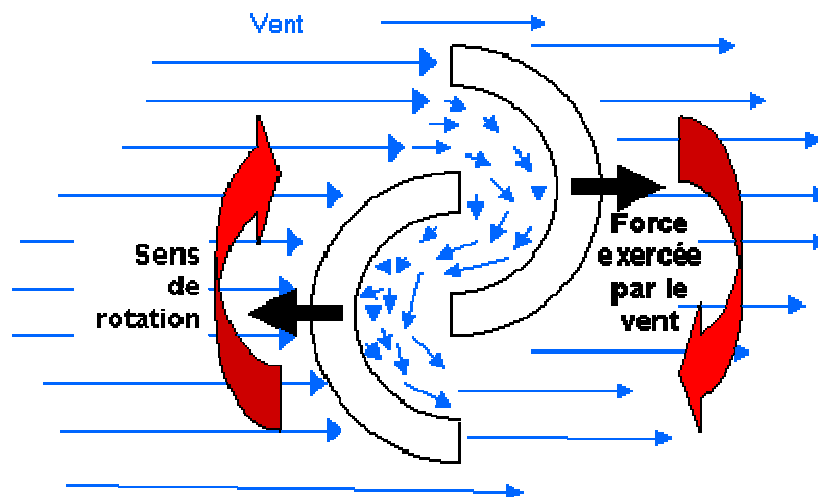
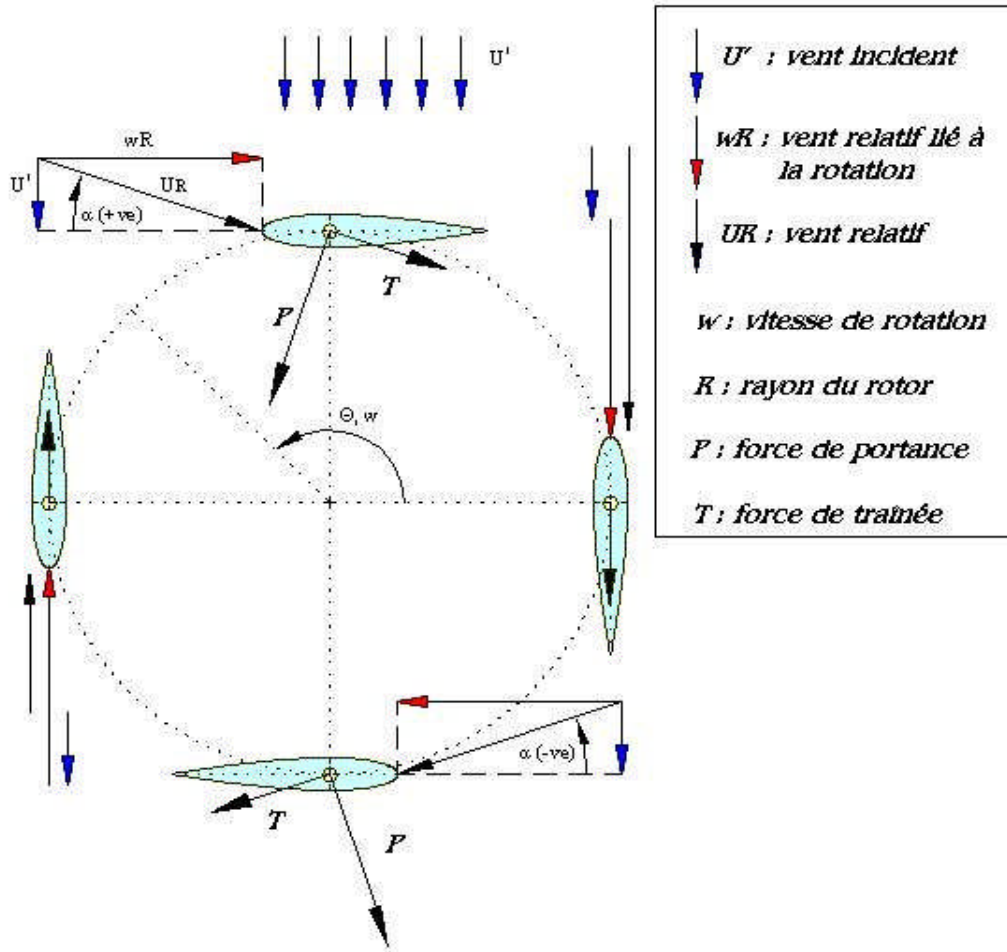


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un rotor Savonius (trainée différentielle)

### I.3.1-b La variation cyclique d'incidence :

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de direction variable. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur faisant tourner le dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent, cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Ce modèle a été breveté par l'ingénieur français Georges Darrieus en 1931, elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pales en forme de C. [5]



**Figure I.5: Principe de fonctionnement du rotor Darrieus  
(variation cyclique d'incidence)**

### I.3.2 Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, leur emprise au sol est très faible et elles captent le vent en hauteur, elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent sert à générer un couple moteur entraînant la rotation, le nombre de pales utilisés est de 1 à 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Elles représentent un coût moins important que celle à axe vertical et sont moins exposées aux contraintes mécaniques, de plus la position en hauteur privilégie l'efficacité. [1]

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6MW.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront aux cas des éoliennes à axe horizontal.



Eolienne tripôle



Eolienne bipôle

**Figure I.6 : Eolienne à axe horizontal**

#### **I.4 Conversion énergie cinétique –mécanique :**

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. Si on considère une masse d'air,  $m$  (kg), qui se déplace avec la vitesse  $v$  (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est : [6]

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{I-1})$$

la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $A$ , en une seconde est: [6]

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{I-2})$$

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $A$  ( $\text{m}^2$ ), située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors : [6]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{I-3})$$

$P_v$  : puissance théorique disponible dans le vent.

$\rho$  : masse volumique de l'air.

Cependant on ne peut pas extraire la totalité de la puissance. On introduit donc, le coefficient de puissance du générateur éolien par la relation : [6]

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{I-4})$$

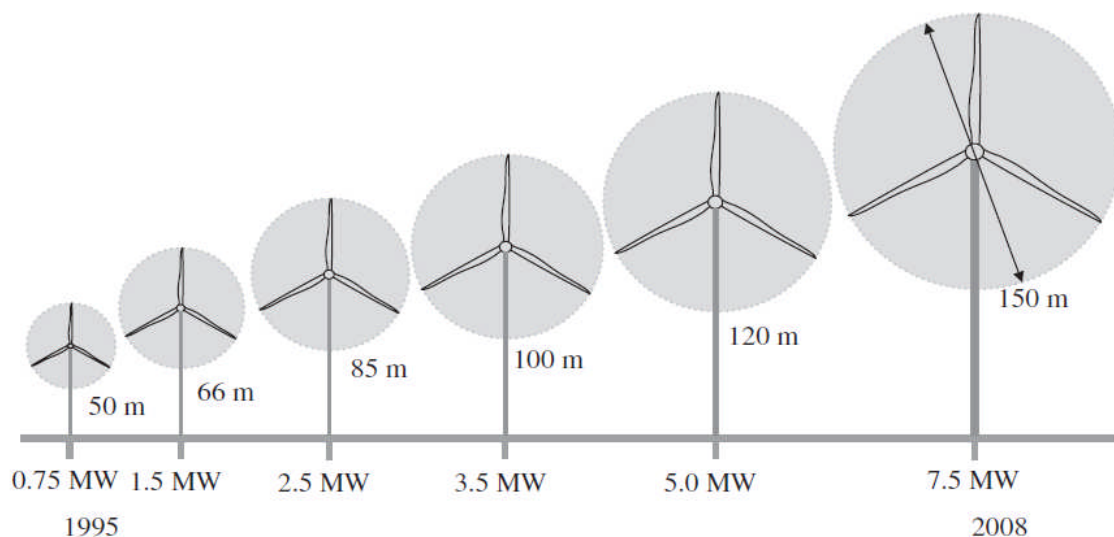
$P_e$  : puissance extraite du vent.

Ce coefficient caractérise l'aptitude du générateur éolien à capter l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc : [6]

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (\text{I-5})$$

$R$  (m) : Rayon de la turbine.

La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée :



**Figure 1.7 : Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions [15]**

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ ) et de l'angle d'inclinaison des pâles  $\beta$ . [6]

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I-6})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{v} \quad (\text{I-7})$$

Où  $R.\Omega$  est la vitesse linéaire périphérique en bout de pâles de l'hélice.

#### I.4.2 Description d'une pale éolienne :

Les pâles de la turbine sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Les éoliennes modernes ont deux ou trois pâles. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 75 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 150 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [4]. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure 1.8.

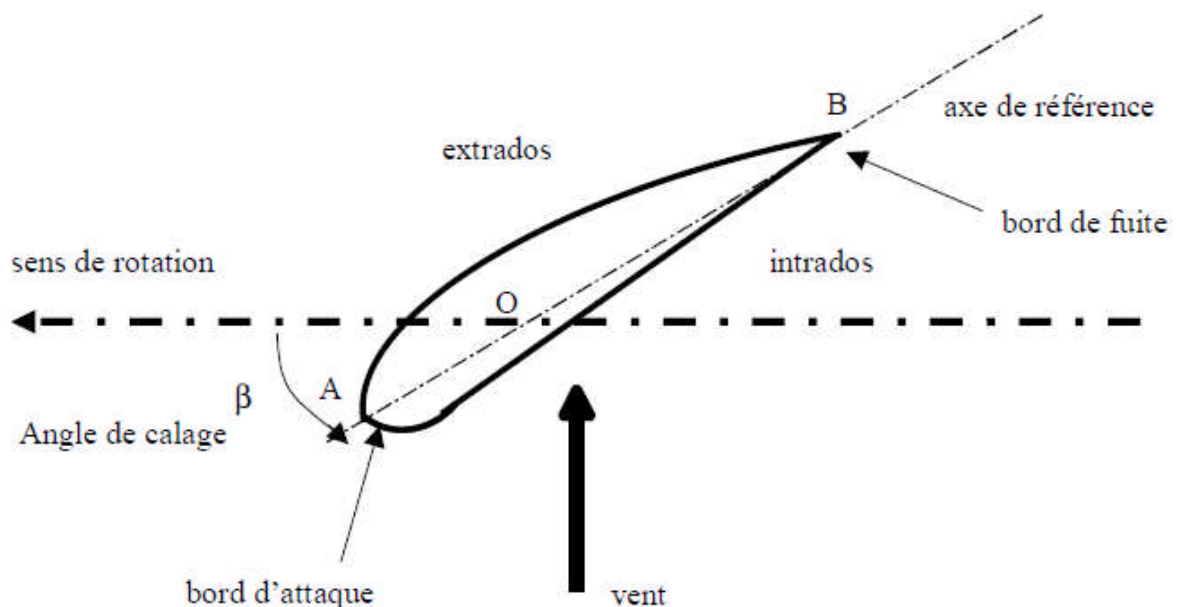


Figure 1.8 : Éléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- extrados : dessus de la pale.

- intrados : dessous de la pôle.
- corde : longueur  $l$  du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage  $\beta$  (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation). [3]

### I.4.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $v_n$ , au delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale  $v_m$  qui pourrait endommager la turbine.

On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- **la zone II** : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- **la zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ .
- **la zone IV** : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta=90^\circ$ ). [6]

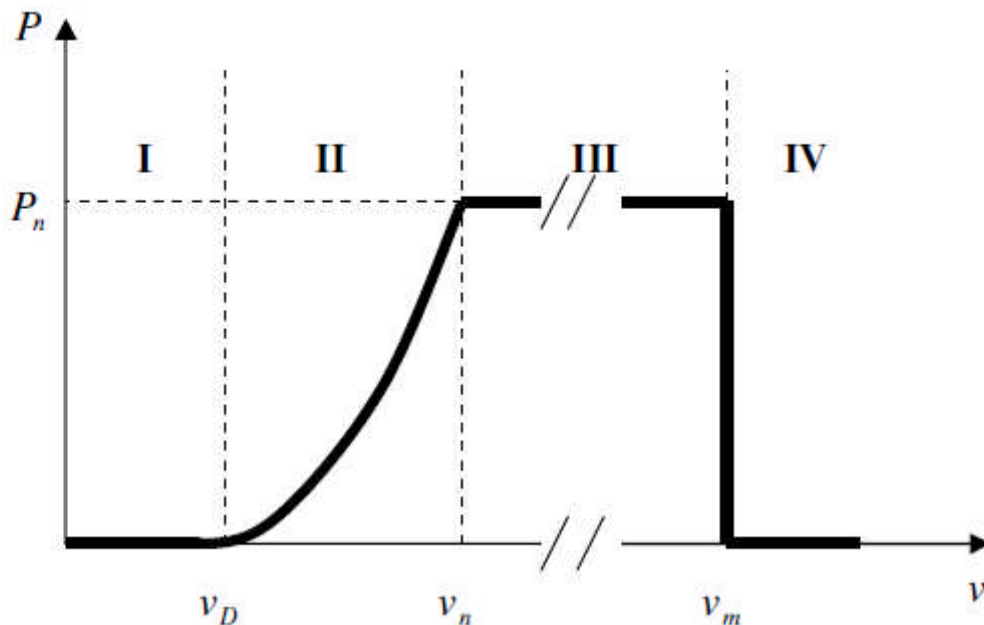


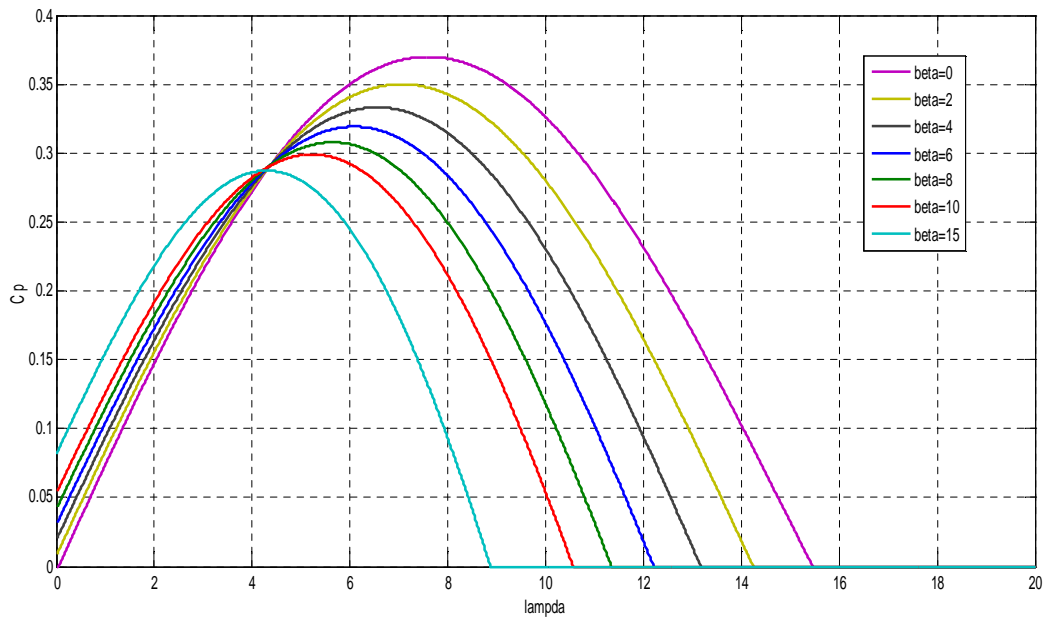
Fig 1.9 : Zone de fonctionnement d'une éolienne

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

- Le système « pitch » ou « pas de calage variable ».
- Le système « stall » ou « à décrochage aérodynamique ».
- Le système « stall actif ». [6]

### I.4.3.1 Le système « pitch » :

La caractéristique  $C_p(\lambda)$  est directement liée à l'aérodynamisme des pâles. La Figure (I.10) montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de  $\beta$ . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pâles sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal  $v_n$  est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse de vent maximale. [6]



**Figure I.10 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple**

Le système « pitch » a pour avantage de permettre un contrôle actif de la puissance sous une large plage de vitesse du vent. L'angle de calage des pales peut être déterminé afin d'optimiser la conversion d'énergie quand le vent évolue entre  $v_D$  et  $v_n$ . Le contrôle de l'angle de calage permet également de réguler la vitesse lorsque  $v > v_n$  et le démarrage à vitesse de vent faible est facilité par le changement de l'angle de calage. [6]

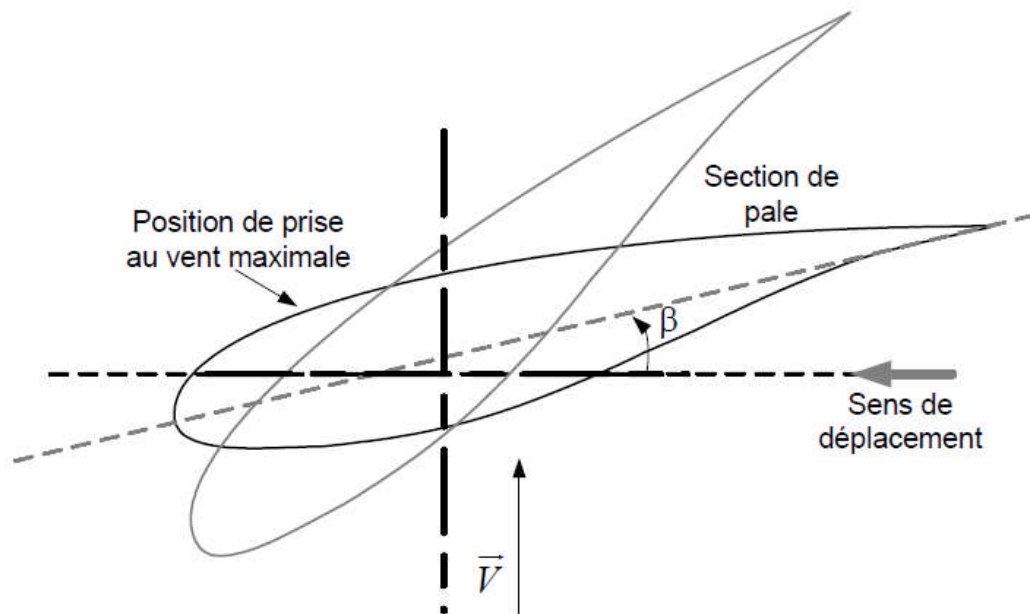


Figure I.11 : Variation de l'angle de calage d'une pôle

#### I.4.3.2 Le système « stall » :

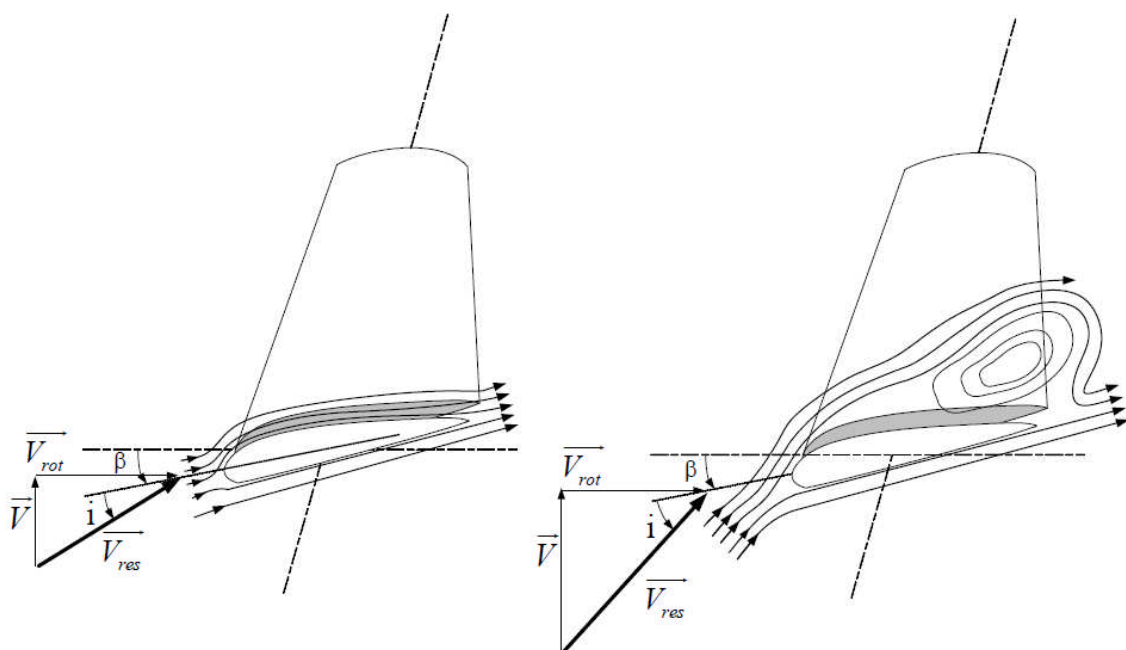
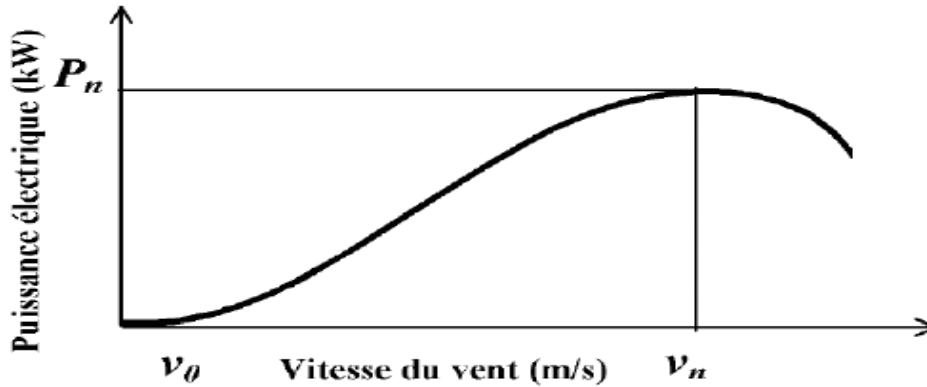


Figure I.12 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

Le système « stall » est beaucoup moins lourd et moins coûteux que le système décrit précédemment. En effet, c'est le profil des pâles établis lors de la construction qui fixe les caractéristiques aérodynamiques. Les pâles 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. Les éoliennes munies du système stall génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent. [1] [6]



**Fig I.13 : Puissance d'éolienne munie d'un système stall**

En comparaison avec le pitch, le « stall » a pour avantage l'absence de système de contrôle d'angle de calage. La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable. [6]

### **I.4.3.3 Le système « stall actif » :**

Le système stall actif est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. Les actionneurs électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite, les mouvements des pales restant de faible amplitude ainsi le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux. [6]

## **I.5 Chaîne de conversion électrique des éoliennes de grande puissance :**

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau alors il tourne à vitesse «fixe» ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone. Si le générateur est lié indirectement au réseau, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. [7]

### **I.5.1 Eoliennes à vitesse fixe :**

#### **I.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :**

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique figure (I.14). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pâles (pitch control). La machine fonctionne alors en hypersynchronisme c'est-à-dire à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme ( $N_s = 1500 \text{ trs.min}^{-1}$ , pour  $p=2$ ) pour un fonctionnement en génératrice.

La rotation des pâles par des actionneurs hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage  $\beta$ . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice.

Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pâles ( $\beta=90^\circ$ ). [8]

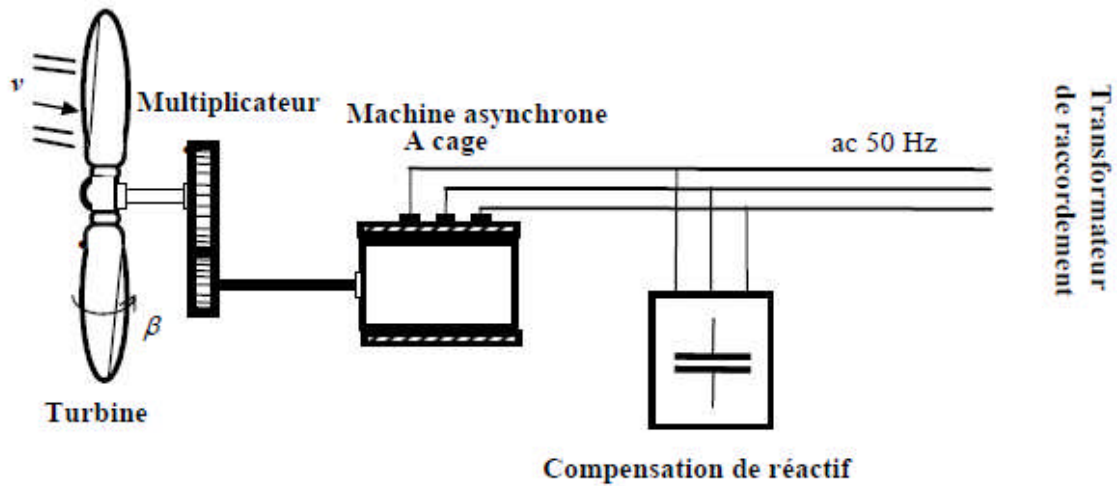


Figure I.14 : Eolienne à vitesse fixe utilisant une MAS

Les diverses qualités de cette machine comme la robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour son utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure I.15.

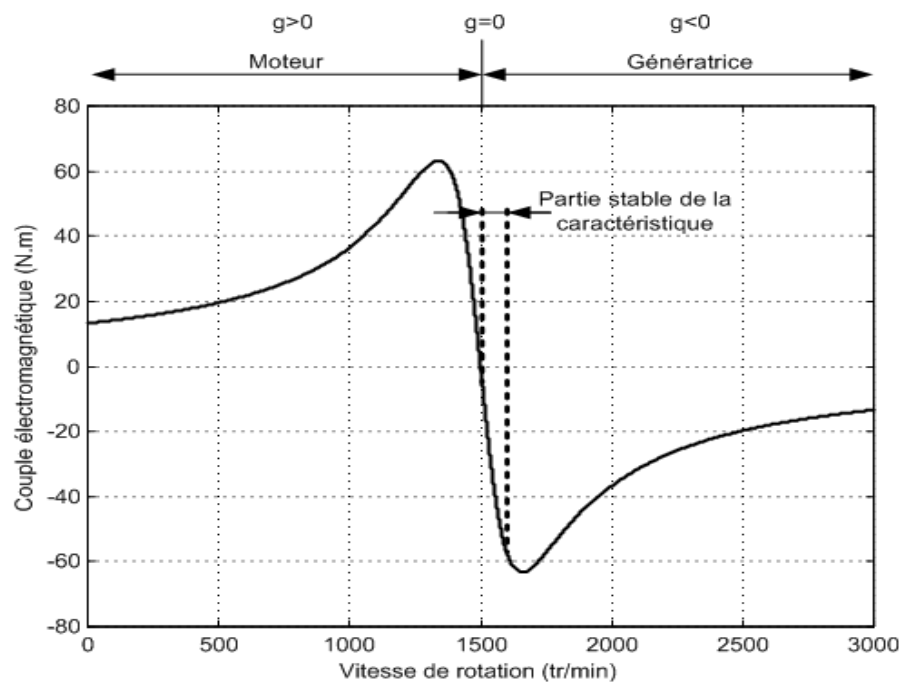


Figure I.15 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min. La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure (I.14) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes à cause de la dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de secondes). Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations. [1]

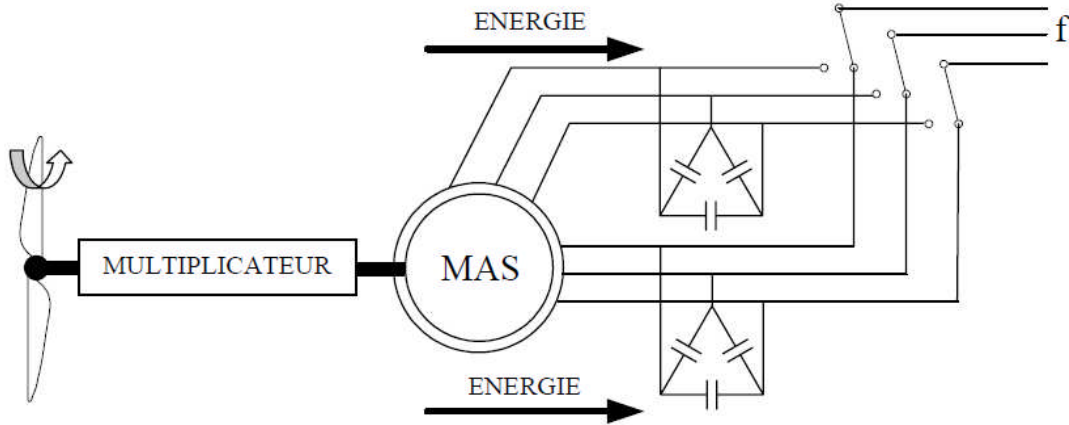
### **I.5.1.2 Machine asynchrone à double stator :**

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.16) :

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

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la

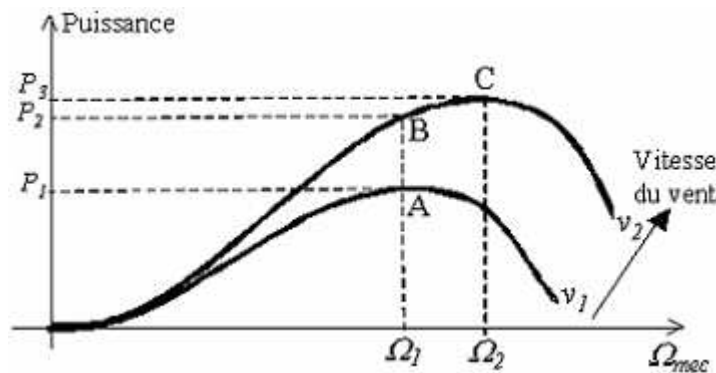
machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [1]



**Figure I.16: Machine asynchrone à double stator**

### I.5.2 Eolienne fonctionnant à vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.17).



**Figure I.17 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent**

Pour une vitesse de vent  $v_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$  on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $v_1$  à  $v_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse

mécanique de la génératrice variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée d'où l'intérêt de faire fonctionner les éoliennes de grande puissance à vitesse variable. Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite (représenté par la courbe en pointillés) sur la figure (I.18). [11]

On peut citer d'autres avantages des éoliennes à vitesse variable comparées à celles fonctionnant à vitesse fixe comme suit :

- Pour des faibles vitesses de vent elles augmentent la plage de fonctionnement, la disponibilité et la puissance générée du système.
- Le système d'orientation des pales étant simplifié puisque le contrôle de la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le système d'orientation des pâles.
- Elles réduisent les efforts mécaniques de par le fait que lors de variations du vent, la vitesse de la turbine est adaptée. L' "élasticité" ainsi créée permet d'amoinrir l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée pour ce domaine de fonctionnement.
- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse et petite. [8]

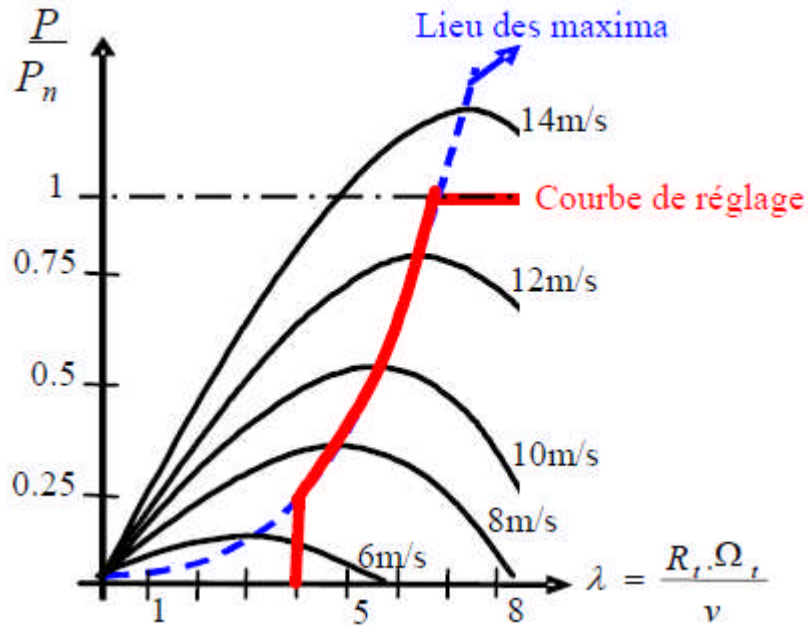
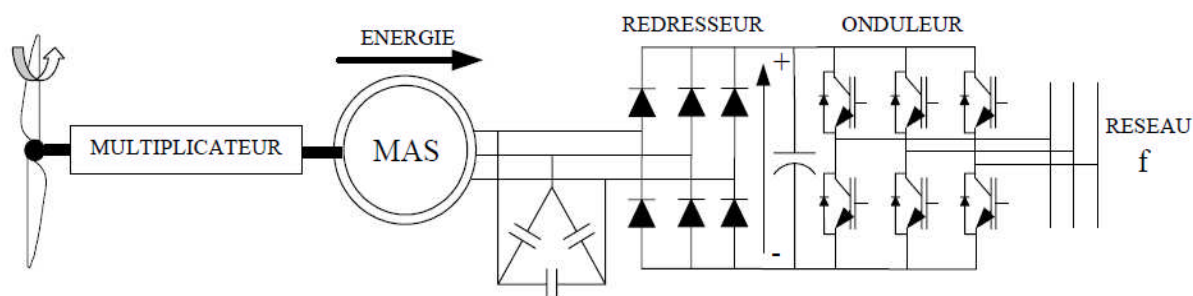


Figure I.18: Exemple de caractéristique de réglage de la vitesse

### I.5.2.1 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la (Figure 1.19) quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est

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



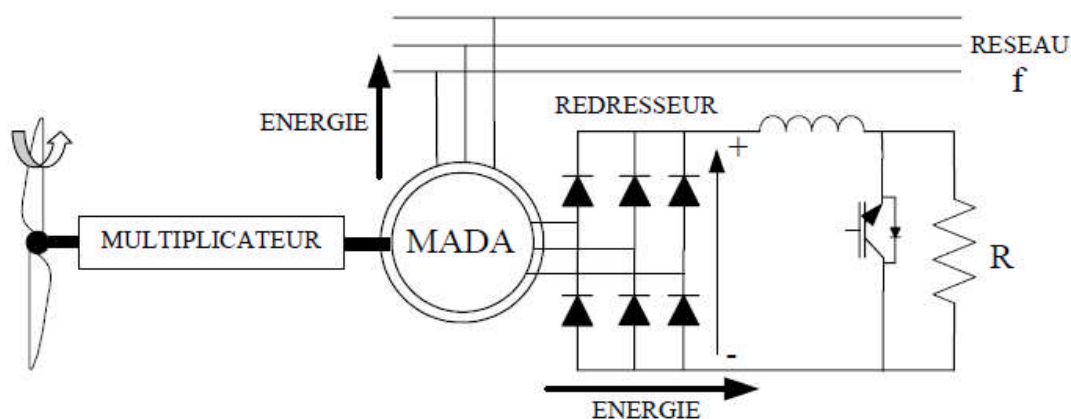
**Figure 1.19: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur**

### I.5.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) 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. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. [1]

### I.5.2.2-a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [1]



**Figure I.20 : MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée**

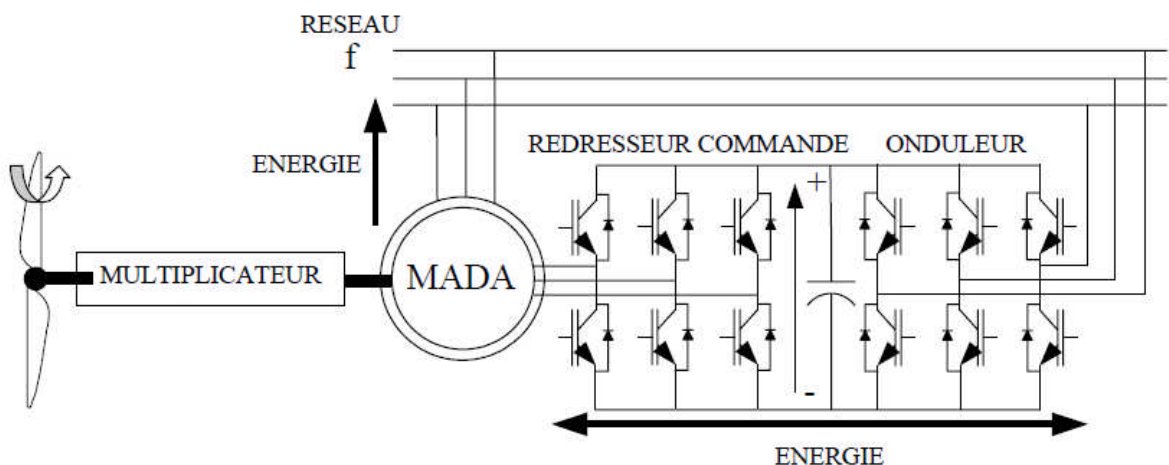
Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Cette solution n'apporte que très peu d'évolutions par rapport à la structure MAS (à cage). Elle conserve les mêmes inconvénients, on peut néanmoins la considérer comme le précurseur des technologies à vitesse variable modernes. [1]



Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT. [1]

### I.5.2.2-c Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées). [1]



**Figure I.23: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI**

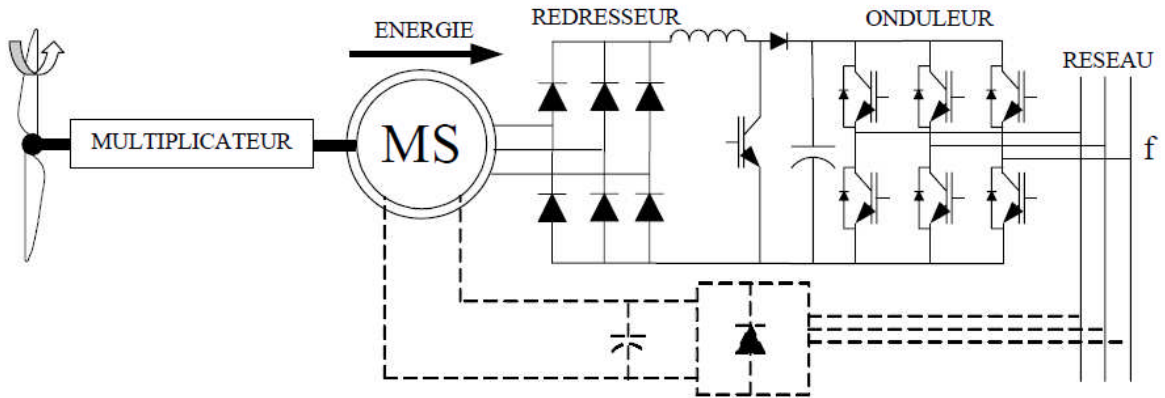
Ce dispositif est viable dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, la puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des  $dv/dt$  importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements. [1]

### **I.5.2.3. Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants :**

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones couplées directement à la turbine évitant ainsi le multiplicateur, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (figure I.24) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. [1]

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents, dans ce cas le système de bagues et de balais est éliminé, et si les aimants permanents sont à grand nombre de paires de pôles (utilisation de la machine à faibles vitesses) le multiplicateur de vitesse peut être supprimé. [1]



**Figure I.24: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI**

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les  $dv/dt$  importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. [1]

### I.5.3 Synthèse des différentes éoliennes :

Les tableaux (I-1) et (I-2) rappellent les différentes caractéristiques des différentes éoliennes.

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<b>MAS</b> Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Machine standard</li> <li>- Machine robuste</li> <li>- Faible coût</li> <li>- Pas d'électronique de puissance pour l'interfaçage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite non optimisée</li> <li>- Maintenance boîte de vitesse</li> <li>- Pas de contrôle de l'énergie réactive</li> <li>- Magnétisation de la machine imposée par le réseau</li> <li>- Plage de vitesse très limitée</li> </ul>

<p><b>MADA</b> Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement à vitesse variable</li> <li>- Puissance extraite optimisée</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale</li> <li>- Machine standard</li> <li>- Connexion de la machine plus facile à gérer</li> <li>- Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance boîte de vitesse</li> <li>- Prix de l'électronique de puissance</li> <li>- Contrôle et commande complexe</li> <li>- Contact glissant bagues – balais</li> </ul>
<p><b>MSAP</b> Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse</li> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.</li> <li>- Connexion de la machine facile à gérer</li> <li>- Possibilité d'absence de boîte de Vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix de l'électronique de puissance</li> <li>- Machine spécifique</li> <li>- Grand diamètre de machine</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice</li> </ul>

**Tableau I-1: Avantages et inconvénients des différentes éoliennes.**

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de contrôle	Fonctionnement Possible
<p><b>MAS</b> Vitesse Fixe</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gradateur</li> <li>- Bancs de condensateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pitch control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle P approximatif</li> <li>- Contrôle Q approximatif si Condensateur</li> </ul>
<p><b>MADA</b> Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Convertisseur électronique AC / AC au rotor (AC/DC puis DC/AC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pitch control</li> <li>- commande en puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle de P</li> <li>- Contrôle de Q</li> </ul>

<b>MSAP</b> Vitesse Variable	- Convertisseur électronique AC/AC au stator (AC/DC puis DC/AC)	- Pitch control (ou stall) - Couple génératrice	- Contrôle de P Contrôle de Q - Fonctionnement en isolé
------------------------------------	--	--	---

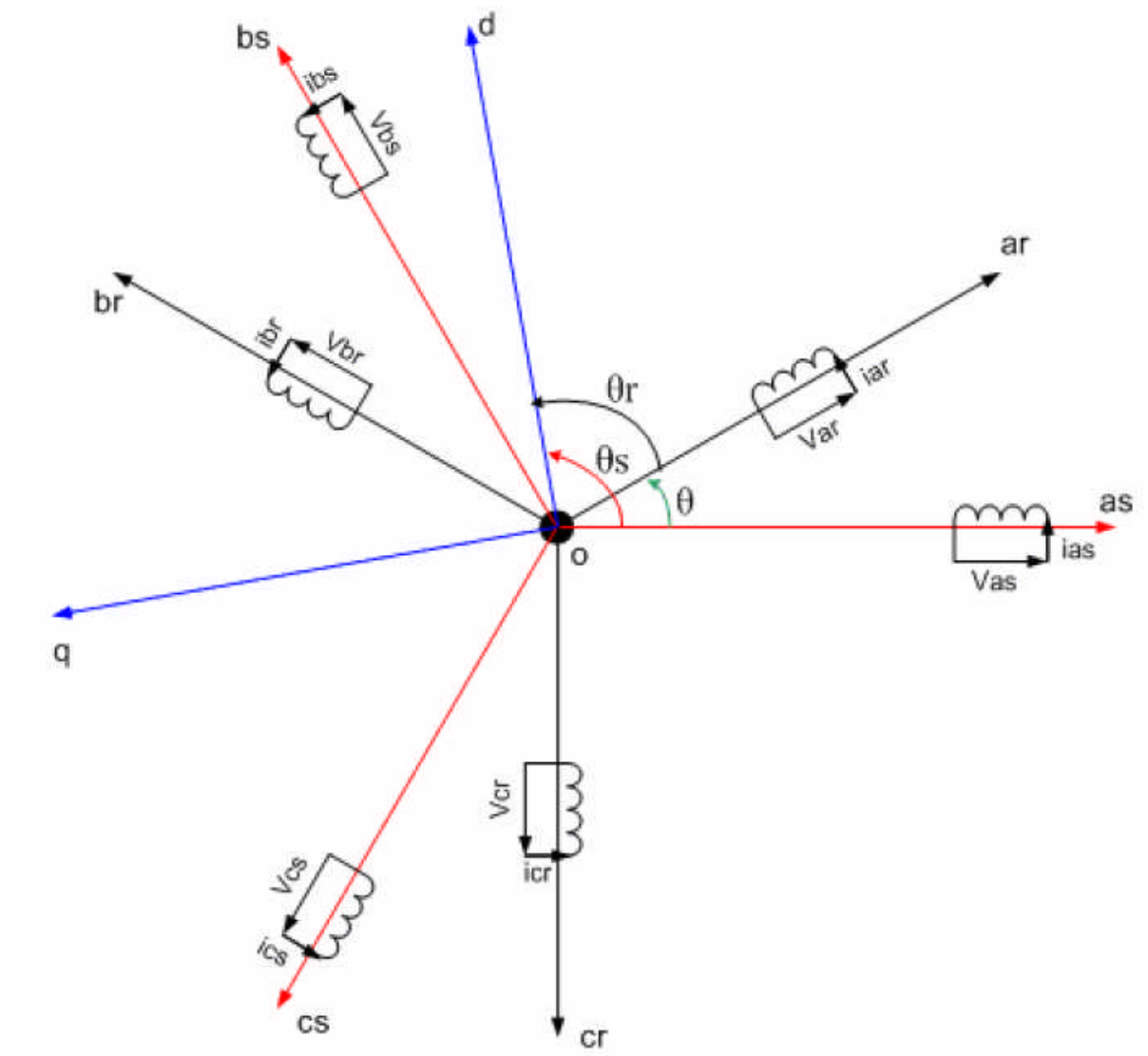
**Tableau I-2 : Capacités de réglage des différentes éoliennes.**

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des différents types d'éoliennes de grande puissance utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique, ainsi que leurs capacités de réglage. Afin d'arriver à une compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, en partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine. Nous avons constaté que les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs, par contre les éoliennes à vitesse variable offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. Par la suite, nous avons présenté le générateur le plus utilisé dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique à savoir la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

# CHAPITRE II

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. Elle est constituée d'une armature fixe (stator) logeant trois enroulements identiques distribués sur la circonférence de la machine dont les axes sont décalés de  $120^\circ$  et constituant  $p$  paires de pôles, le rotor est aussi constitué de trois enroulements identiques constituant  $p$  paires de pôles. Elle est représentée sur la figure (II.1) dans un plan perpendiculaire à son axe de rotation. [9]



**Figure II.1 : représentation schématique de la MADA dans le repère abc**

Il est 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 les pertes par hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans chaque phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de 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. [9]

## II.1 Equations électriques dans les axes a,b,c :

En tenant compte des hypothèses ci-dessus, le modèle de la MADA comporte :

Trois équations statoriques et trois équations rotoriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$$[V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t$$

$$[V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^t$$

$$[I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$$

$$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$$

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

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

Où  $R_s$  : résistance d'une phase statorique

Rr : résistance d'une phase rotorique

## II.2 Equations magnétiques :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

Avec:

$$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^t$$

$$[I_s] = [i_{as} \ i_{bc} \ i_{cs}]^t$$

$$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^t$$

$$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Et :  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$

-  $L_{as}$  : Inductance propre d'une phase statorique.

- $L_{ar}$  : Inductance propre d'une phase rotorique.
- $M_{as}$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
- $M_{ar}$  : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
- $M_{rs}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor (obtenue quand les axes magnétiques des deux phases sont alignés).

De (II.1) et (II.2) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_{ss}]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

### II.3 Equation mécanique de la machine :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (\text{II-4})$$

Le couple électromagnétique peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance.

$$C_{em} = P[I_s] \frac{d}{d\theta}([M_{sr}][I_r]) \quad (\text{II-5})$$

Le fonctionnement de la machine est régi par un système d'équations non linéaires, dépendant de  $L(\theta)$ , sa résolution analytique dans le repère (abc) est très difficile, ce problème se simplifie en adoptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé équivalent. [10]

### II.4 Modèle de la MADA dans le plan (dq) :

#### II.4.1 La transformation de park :

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle du système précédent. Dans la matrice de Park, c'est l'angle  $\theta_s$  qui intervient pour les grandeurs statoriques et  $\theta_r$  pour les grandeurs rotoriques. [9]

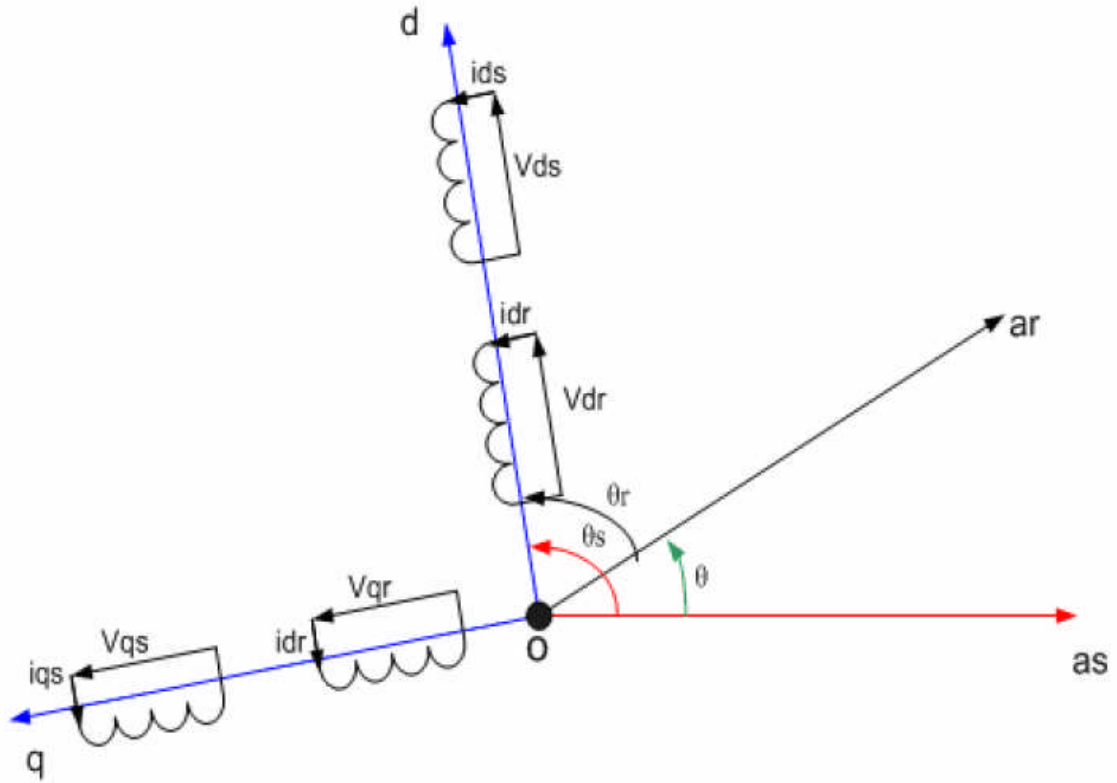


Figure II.2 : représentation schématique de la MADA dans le repère dq

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II - 6})$$

Et la matrice de transformation inverse de Park :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II - 7})$$

Ainsi les grandeurs statoriques et rotoriques sont transformées comme suit:

Les tensions :

$$\begin{cases} [V_{sdq0}] = [P(\theta_s)] [V_{Sabc}] \\ [V_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [V_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

Les courants :

$$\begin{cases} [i_{sdq0}] = [P(\theta_s)] [i_{Sabc}] \\ [i_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [i_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

Les flux :

$$\begin{cases} [\varphi_{sdq0}] = [P(\theta_s)] [\varphi_{Sabc}] \\ [\varphi_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

#### II.4.2 Equations magnétiques dans les axes d et q :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

$$\varphi_{0s} = L_{0s} i_{0s} \quad \varphi_{0r} = L_{0r} i_{0r} \quad (\text{II-13})$$

En supposant que le système est symétrique, les grandeurs homopolaires sont nulles. [16]

Avec:

- $L_s = L_{as} - M_{as}$  : inductance propre cyclique du stator
- $L_r = L_{ar} - M_{ar}$  : inductance propre cyclique du rotor
- $M = \frac{3}{2} M_{rs}$  : inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor
- $L_{0s} = L_{as} + 2M_{as}$  : inductance homolaire statorique
- $L_{0r} = L_{ar} + 2M_{ar}$  : inductance homolaire rotorique

### II.4.3 Equations électriques dans les axes d et q :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{ds} \\ v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} + R_r i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} + R_s i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

### II.4.4 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q :

La transformation de Park conserve la puissance instantanée donc la puissance instantanée au stator s'écrit :

$$P_s = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (\text{II-16})$$

$$P_s = \left( \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_d \right) i_{ds} + \left( \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{qs} \right) i_{qs}$$

$$P_s = (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2) + \left( \frac{d\varphi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} i_{qs} \right) + (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II-17})$$

Le premier terme correspond aux pertes joules.

Le second terme correspond à l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.

Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.[12]

Cette dernière peut se mettre sous la forme :

$$P_t = C_{em} \cdot \Omega_s = (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \cdot \omega_s \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Où : } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{et} \quad \omega_s = p \cdot \Omega_s$$

$P_t$  : puissance transmise du stator au rotor, et  $p$  : nombre de paire de pôle de la machine.

Alors le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p.(\varphi_{ds}.i_{qs} - \varphi_{qs}.i_{ds}) \quad (\text{II-19})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple en utilisant les expressions des flux statoriques et rotoriques. [12]

De (II.11), (II.12) et (II.19) on aura :

$$C_{em} = p.[(L_s.i_{ds} + M.i_{dr}).i_{qs} - (L_s.i_{qs} + M.i_{qr}).i_{ds}]$$

$$C_{em} = p.M.(i_{qs}.i_{dr} - i_{ds}.i_{qr}) \quad (\text{II-20})$$

De l'équation (II.11) on tire le courant  $i_{dr}$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r}.(\varphi_{dr} - M.i_{ds}) \quad (\text{II-21})$$

De l'équation (II.12) on tire le courant  $i_{qr}$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r}.(\varphi_{qr} - M.i_{qs}) \quad (\text{II-22})$$

On remplace (II.21) et (II.22) dans (II.20) le couple devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} [(\varphi_{dr} - M.i_{ds}).i_{qs} - (\varphi_{qr} - M.i_{qs}).i_{ds}]$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (i_{qs}\varphi_{dr} - i_{ds}\varphi_{qr}) \quad (\text{II-23})$$

De l'équation (II.11) on tire le courant  $i_{ds}$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s}.(\varphi_{ds} - M.i_{dr}) \quad (\text{II-24})$$

De l'équation (II.12) on tire le courant  $i_{qs}$ ,

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s}.(\varphi_{qs} - M.i_{qr}) \quad (\text{II-25})$$

On remplace (II.24) et (II.25) dans (II.20) le couple devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} [i_{dr} \cdot (\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}) - i_{qr} \cdot (\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr})]$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (\text{II-26})$$

On constate que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant, ces expressions ressemblent à l'expression du couple de la machine à courant continu où le collecteur permet d'obtenir un découplage, le problème posé ici est de pouvoir contrôler indépendamment l'un de l'autre, le terme de flux et le terme de courant, d'où l'intérêt d'utiliser la commande vectorielle. [12]

### II.4.5 Choix du référentiel du travail :

Le référentiel de travail est le système d'axes  $od$  et  $oq$  associé à la vitesse de rotation choisie pour lui. Ce repère fait un angle  $\theta_s$  avec le stator et un angle  $\theta_r$  avec le rotor. [16]

$$\text{Soit ; } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad , \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad , \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad \text{donc} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r$$

$\theta_s$  : pulsation des courants statoriques.

$\omega$  : vitesse électrique du rotor.

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} : \text{glissement}$$

$\omega_r = g \cdot \omega_s$  : pulsation des courants rotoriques.

il existe trois choix de référentiels intéressants :

#### a- Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est préférable pour étudier les variations importantes de la vitesse de rotation donc il est adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, il se caractérise par ;

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{donc} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} = - \frac{d\theta_r}{dt}$$

**b- Référentiel lié au rotor :**

Ce référentiel tourne à la même vitesse que le rotor, il est préférable pour étudier les régimes transitoires où la vitesse de rotation peut être considérée constante, il se caractérise par ; [16]

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{donc} \quad \omega_s = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt}$$

**c- Référentiel lié au champ tournant :**

Ce référentiel tourne à la vitesse de synchronisme, dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont continues en régime permanent, il est préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine, il se caractérise par ; [16]

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

Le modèle de la machine s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs}.\omega_s + R_s.i_{ds} \\ v_{qs} = \frac{\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds}.\omega_s + R_s.i_{qs} \\ v_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr}.\omega_s + R_r.i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr}.\omega_s + R_r.i_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{II} - 27)$$

$$C_{em} - Cr = f.\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{où} \quad C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr}\varphi_{qs} - I_{qr}\varphi_{ds})$$

**II.4.6 Mise sous forme d'équations d'état :**

On met le système sous forme d'équations d'état :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} . \mathbf{X} + \mathbf{B} . \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} . \mathbf{X} + \mathbf{D} . \mathbf{U} \end{array} \right.$$

On choisit le vecteur d'état  $\mathbf{X}$  comme suit :  $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ \Omega \end{pmatrix}$

Et les grandeurs  $v_{dr}$ ,  $v_{qr}$  sont considérées comme variable de commande. [10]

Le modèle mathématique de la machine devient :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = v_{ds} - \frac{1}{T_s} \varphi_{ds} + \frac{1}{T_s} M \cdot i_{dr} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = v_{qs} - \frac{1}{T_s} \varphi_{qs} + \frac{1}{T_s} M \cdot i_{dr} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} v_{ds} + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \frac{1}{T_s} \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \omega \cdot \varphi_{qs} - \frac{M^2 + R_r \cdot L_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} v_{qs} + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \omega \cdot \varphi_{ds} + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \frac{1}{T_s} \varphi_{qs} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} - \frac{M^2 + R_r \cdot L_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot i_{qr} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} v_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{p \cdot M}{J \cdot L_s} (\varphi_{qs} i_{dr} - \varphi_{ds} i_{qr}) - \frac{C_r}{J} - \frac{1}{J} f \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{II} - 28)$$

Avec :  $T_s = \frac{L_s}{R_s}$  (constante de temps statorique) ,  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  (coefficient de dispersion).

## II.5 Bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné: [11]

Avant d'introduire le bilan des puissances d'une MADA on commence d'abord par une machine asynchrone à rotor bobiné, en effet La MADA n'est qu'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par le stator et par le rotor.

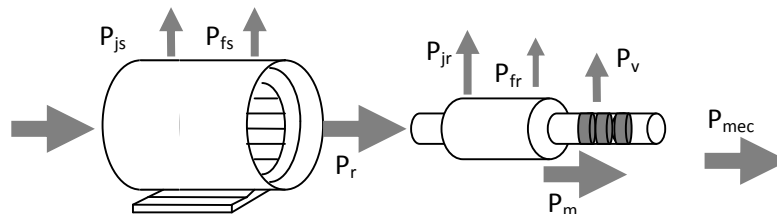


Figure II.3 : bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné

$P_s$  : Puissance absorbée au stator

$P_{js}$  : pertes Joule statoriques

$P_{fs}$  : pertes fer statoriques

$P_r$  : Puissance transmise au rotor

$P_{jr}$  : pertes Joule rotoriques

$P_{fr}$  : pertes fer rotoriques

$P_v$  : pertes par ventilation

$P_m$  : Puissance mécanique développée

$P_{mec}$  : Puissance mécanique transmise à la charge

**Puissance absorbée au stator : [11]**

$$P_s = 3.E_s.I_s.\cos\varphi \quad (\text{II-29})$$

Où :  $E_s$  : Tension entre phase et neutre du stator.

$I_s$  : courant dans une phase du stator.

$\varphi$  : déphasage entre tension et courant statorique.

**Puissance transmise au rotor :**

$$P_r = P_s - P_{js} - P_{fs} \quad (\text{II-30})$$

**Pertes Joule rotoriques : [11]**

$$P_{jr} = g.P_r \quad (\text{II-31})$$

**Puissance mécanique développée : [11]**

$$P_m = P_r.(1 - g) \quad (\text{II-32})$$

**Puissance mécanique transmise à la charge : [11]**

$$P_{mec} = P_m - P_v \quad (\text{II-33})$$

Les figures ci-dessous montrent les deux configurations de fonctionnement de la génératrice asynchrone à double alimentation dont le rotor est relié directement au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur.

### II.5.1 Bilan des puissances dans un générateur asynchrone à double alimentation en mode hypo-synchrone :

La figure (II-4) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Donc un fonctionnement en dessous de la vitesse de synchronisme la machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement. [1]

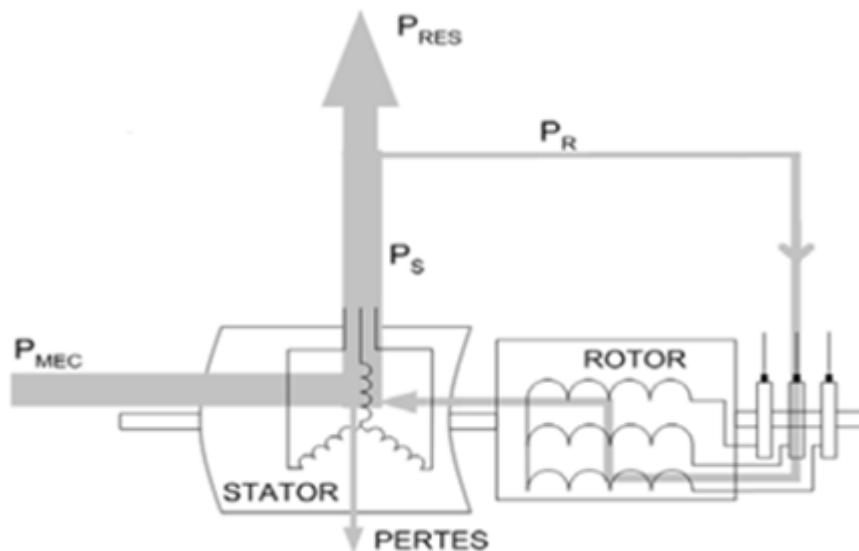
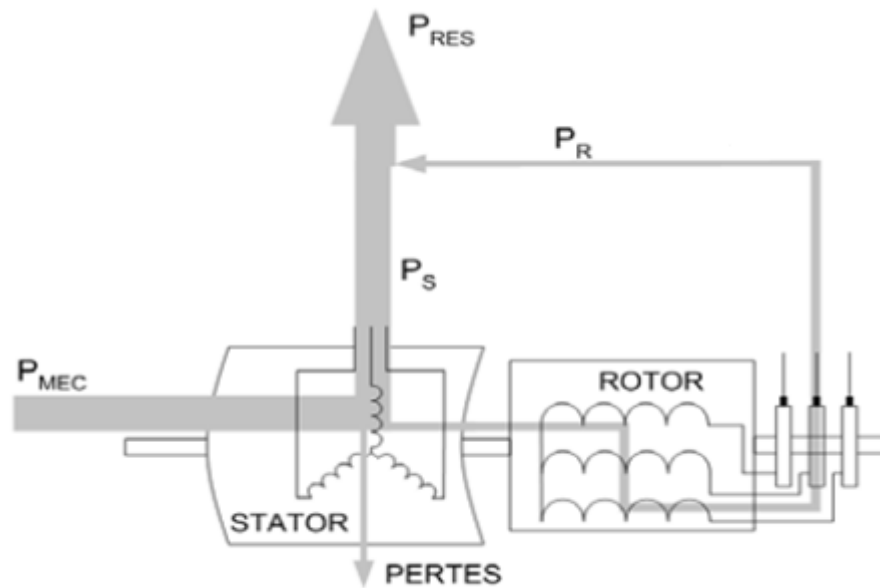


Figure II.4 : fonctionnement en génératrice hyposynchrone

### II.5.2 Bilan des puissances dans un générateur asynchrone à double alimentation en mode hyper-synchrone :

La figure (II.5) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau on a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte Joule dans le rotor. [1]



**Figure II.5 : fonctionnement en génératrice hypersynchrone**

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (abc), on a fait appel à la transformation de Park pour transformer la machine triphasée en une machine biphasée équivalente, cette transformation permet une réduction notable de la complexité de la résolution des équations différentielles du système.

# CHAPITRE III

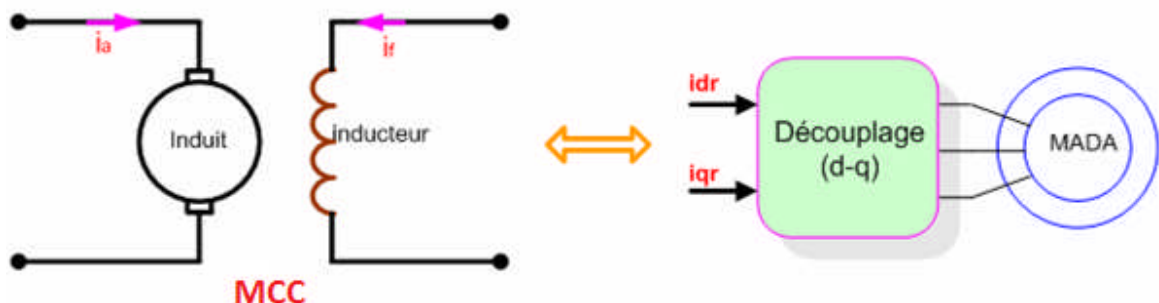
Nous avons vu dans le chapitre précédent que dans le cas de la MADA, le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor, par conséquent toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit par une évolution du flux induit dans le rotor, donc pour contrôler le couple. Il faut donc réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux par un système de commande externe à la machine, et cela en appliquant la commande vectorielle qui a été proposée en 1971 par Blashke, elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux suivant l'axe direct du repère choisi. La commande à flux orienté permet ainsi de considérer la MADA comme une machine à courant continu, c'est-à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée.

### III.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté :

Dans le cas de la machine à courant continu, le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple, il s'agit de placer le référentiel (dq) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d), ainsi le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante.

Lors de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant, les champs statoriques, rotoriques et d'entrefer de la machine tournent à la vitesse du référentiel (dq) par rapport au stator.

L'orientation de l'un de ces trois champs suivant l'axe (d) du référentiel constitue le principe de base de la commande vectorielle.



**Figure III.1: équivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA**

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$\begin{cases} C_{em} = K \cdot \varphi_f \cdot I_a \\ \varphi_f = K \cdot I_f \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

L'expression du  $C_{em}$  de la machine asynchrone à double alimentation dans le chapitre précédent est :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds})$$

Dans ce cas la machine est modélisée en moteur, en génératrice le  $C_{em}$  s'inverse. Dans la suite du travail on affecte le signe (-) au couple afin de modéliser la machine en génératrice.

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (\text{III-2})$$

En se basant sur cette équation on peut réaliser un découplage de telle sorte que le couple soit commandé uniquement par le courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$ , la relation finale du couple sera :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{III-3})$$

## III.2 Commande vectorielle de la MADA :

### III.2-a Procédé d'orientation du flux :

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. En choisissant le repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe (d).

Afin d'obtenir un couple maximal il faut imposer l'une des conditions suivantes :

- Orientation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases}$$

Avec  $\varphi_r$  : flux rotorique

- Orientation du flux statorique :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases}$$

Avec  $\varphi_s$  : flux statorique

- Orientation du flux magnétisant

$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \varphi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases}$$

Avec  $\varphi_m$  : flux magnétisant

### III.2-b Orientation du flux statorique :

On choisit un référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique et on aligne le vecteur flux statorique avec l'axe (d).

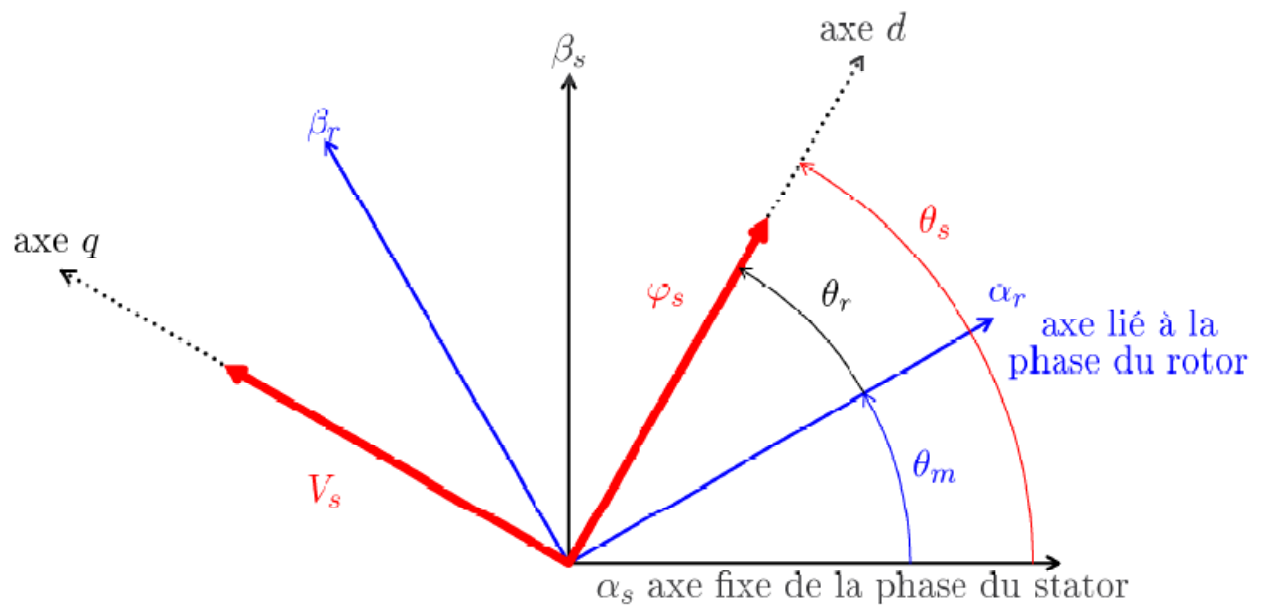


Figure III.2 : Orientation de flux statorique suivant l'axe d

D'après la figure (III.2) :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases}$$

Le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{III-4})$$

Si on considère que le réseau électrique est stable, le flux  $\varphi_{ds}$  sera constant, il en résulte que le couple et la puissance active dépendent uniquement de  $I_{qr}$ .

Les équations électriques au stator dans les axes a,b,c s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

Si on néglige la chute de tension aux bornes de  $R_s$  devant la fem de rotation (ce qui est le cas des machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne), les équations électriques deviennent :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Ce qui montre que le vecteur tension statorique est en avance de  $\pi/2$  par rapport au flux, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_{ds} = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Des équations magnétiques statoriques on tire les expressions des courants statoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Donc :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

### III.2-c Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone dans un repère diphasé quelconque s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices

$$(V_{ds} = 0 \quad ; \quad V_{qs} = V_s)$$

$$\begin{cases} P = V_s \cdot I_{qs} \\ Q = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

En remplaçant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  par leurs expressions, celles des puissances actives et réactives deviennent:

$$\begin{cases} P = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \cdot \varphi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

En approximant  $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  on aura ;

$$\begin{cases} P = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Si on considère que l'inductance magnétisante  $M$  est constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$  près imposée par le réseau.

### III.2-d Relation entre tension rotorique et courant rotorique :

D'après les équations (II-11) , (II-12) et (III-9) nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

On remplace les expressions des flux rotoriques d'axe (d) et (q) dans les expressions des tensions rotoriques diphasés, donc le système devient :

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + (L_r - M^2 / L_s) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot (L_r - M^2 / L_s) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + (L_r - M^2 / L_s) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot (L_r - M^2 / L_s) i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

Finalemnt :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

$$\text{Avec } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

En régime permanent les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent et on aura comme équations ;

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

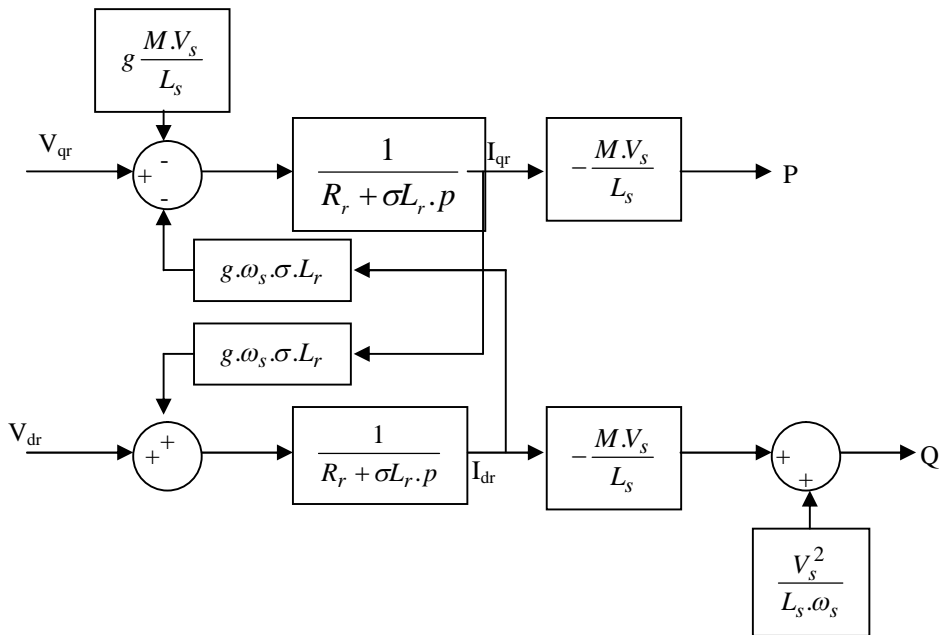
$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants voulus. L'influence des termes de couplage est faible, une commande adéquate permettra

de les compenser. Le terme  $g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s}$  n'est par contre pas négligeable car il représente une fem dépendant de la vitesse de rotation. Sa présence entraîne une erreur de trainage et la commande devra la prendre en compte.

A partir des équations ;

$$\left\{ \begin{array}{l} P = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{array} \right.$$

On peut établir le schéma bloc du système à réguler représenté sur la figure III-3.



**Figure III.3 : schéma bloc du système à réguler.**

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du 1<sup>er</sup> ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir une commande vectorielle car les influences des couplage resteront faibles et les axes d et q pourront être commandés séparément avec

chacun son propre régulateur, les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

Il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

- **La première méthode** : consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive, elle est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- **La deuxième méthode** : consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances (active et réactive) et les courants rotoriques, cette méthode est appelée méthode indirecte.

C'est la méthode directe qui va être étudiée et simulée, son intérêt est que sa mise en œuvre est simple par contre la méthode indirecte qui est plus complexe a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permet de faire une protection de la machine en limitant ces courants.

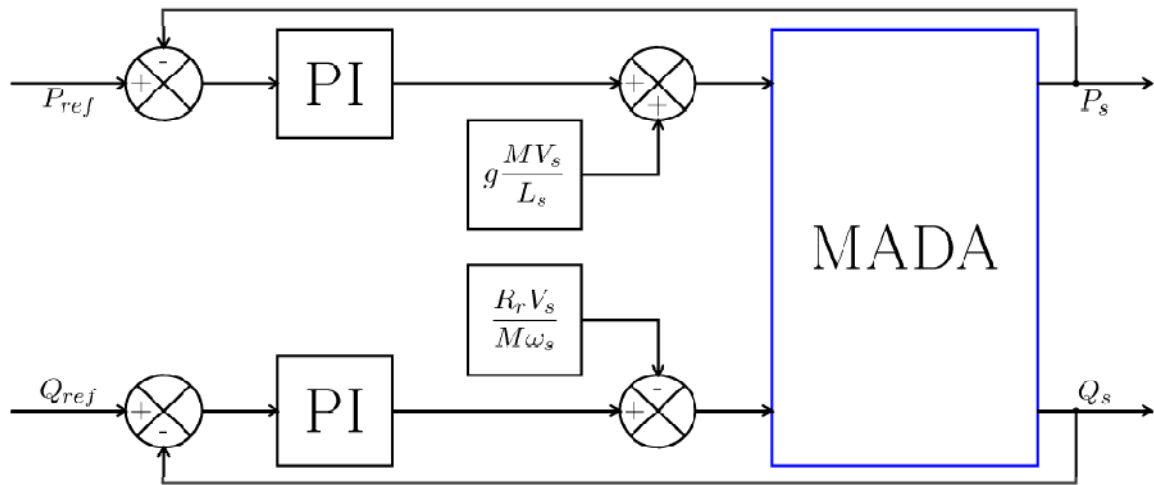
### III.3 Régulation de puissance :

#### III.3-a Mise en place de la régulation :

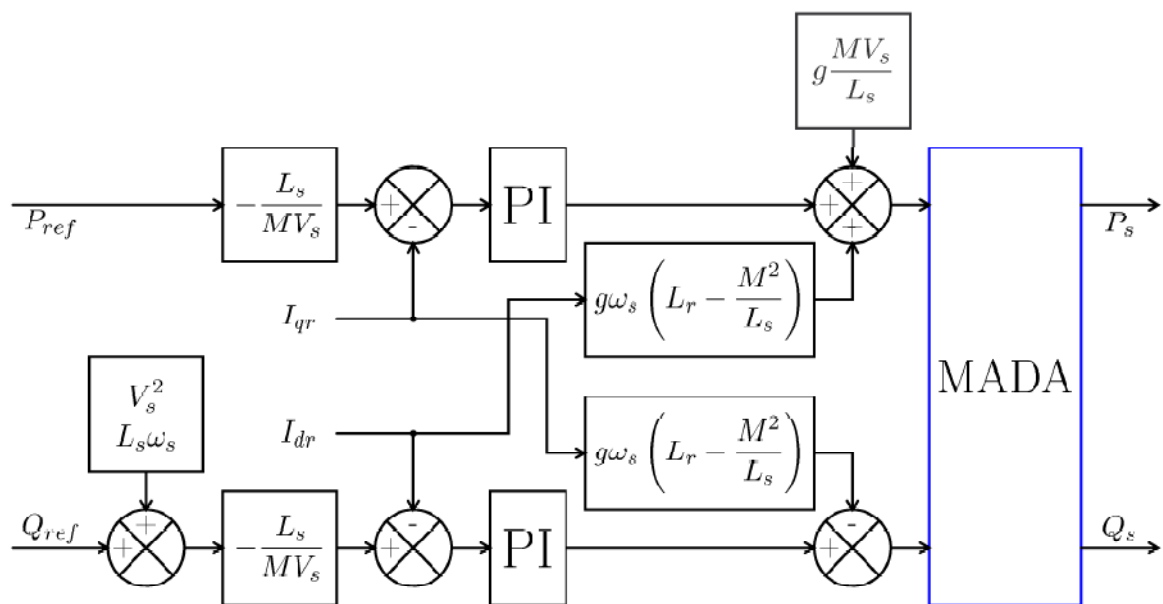
Sur la figure (III.3) si l'on considère la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{M.V_s}{L_s}$ , qui est considéré comme constant car l'éolienne est supposée raccordée à un réseau de forte puissance et stable. Donc il n'y aura pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine on met en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III.3).

Du fait de la faible valeur du glissement on néglige les termes de couplage entre les deux axes de contrôle, on aura alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe présenté sur la figure (III.4).



**Fig III.4 : Schéma bloc de la commande directe**



**Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte**

### III.3-b Synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI) :

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la MADA, la figure III.6 montre la boucle de régulation du système corrigé par le régulateur (PI) dont la fonction de transfert est

$$FT_{PI}(p) = k_p + \frac{k_i}{p}$$

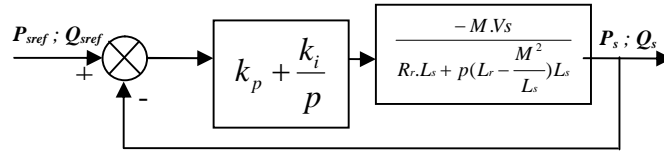


Figure III.6 : Schéma bloc du système régulé par un PI

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (\text{III-19})$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{III-20})$$

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

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (\text{III-21})$$

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

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (\text{III-22})$$

$$FTBF = \frac{\frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}}{1 + \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}} = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \cdot p} \quad (\text{III-23})$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad (\text{III-24})$$

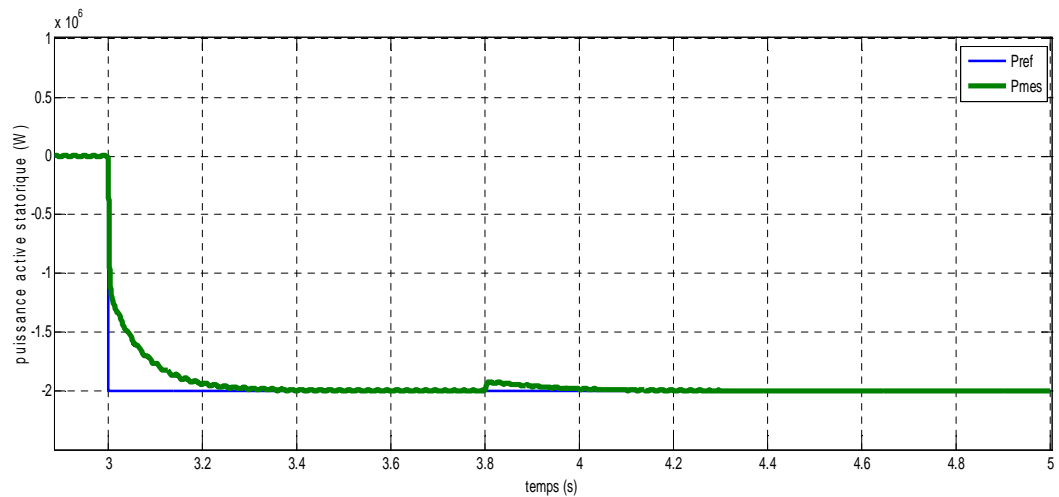
$$\text{On déduit } \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

$\tau_r$  désigne le temps de réponse du système, dans notre étude on choisie  $\tau_r = 10\text{ms}$  correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation dans le système éolien où les variations de vent sont peu rapide et les constantes de temps mécanique sont importantes.

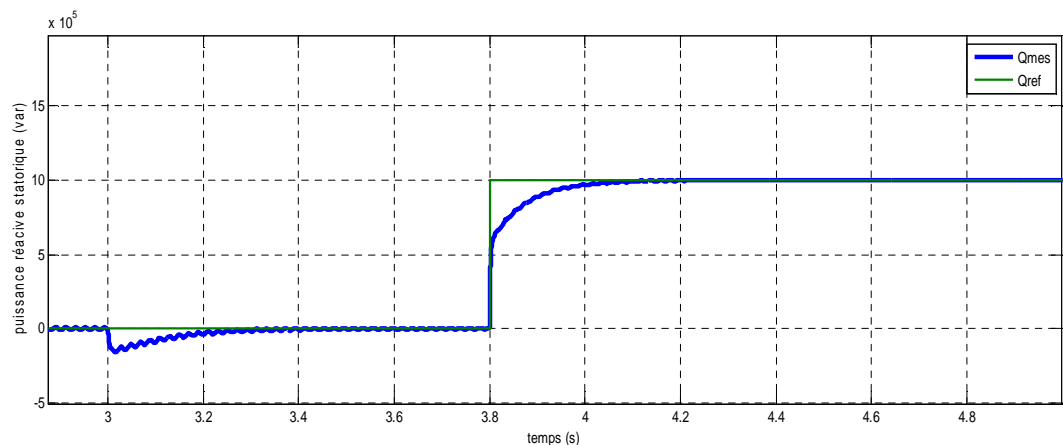
Donc les gains du régulateur  $k_p$  et  $k_i$  peuvent être exprimés en fonction de  $\tau_r$  et des paramètres de la machine comme suit :

$$k_p = \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s \tau_r} \quad (\text{III-25})$$





**Figure III.8-a : Résultats de simulation pour l'essai de suivi de consigne de la puissance active**



**Figure III.8-b : Résultats de simulation pour l'essai de suivi de consigne de la puissance réactive**

### III.4.2 Sensibilité aux perturbations :

Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

Conditions de l'essai :

- Machine entraînée à 1050 tr/min.
- Consigne de puissance active fixe de  $-2$  MW.
- Consigne de puissance réactive fixe de 1MVAR.
- A  $t=3$ s, la vitesse passe brusquement de 1050 à 1450 tr/min.

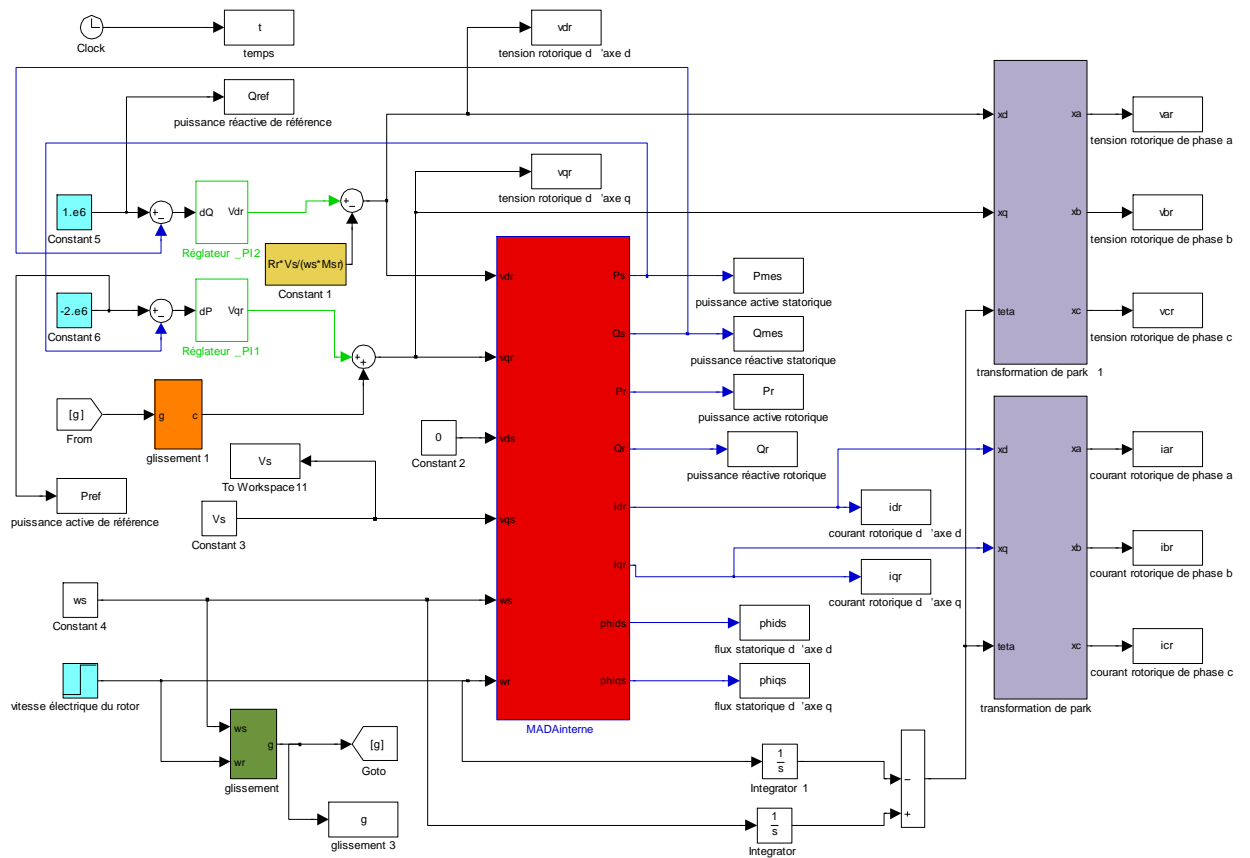


Figure III.9 : Schéma de simulation pour l'essai de sensibilités aux perturbations

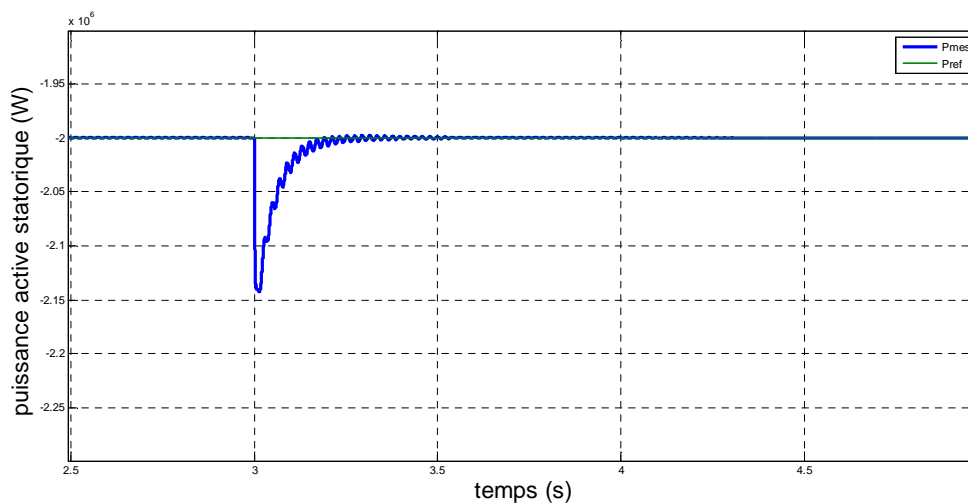
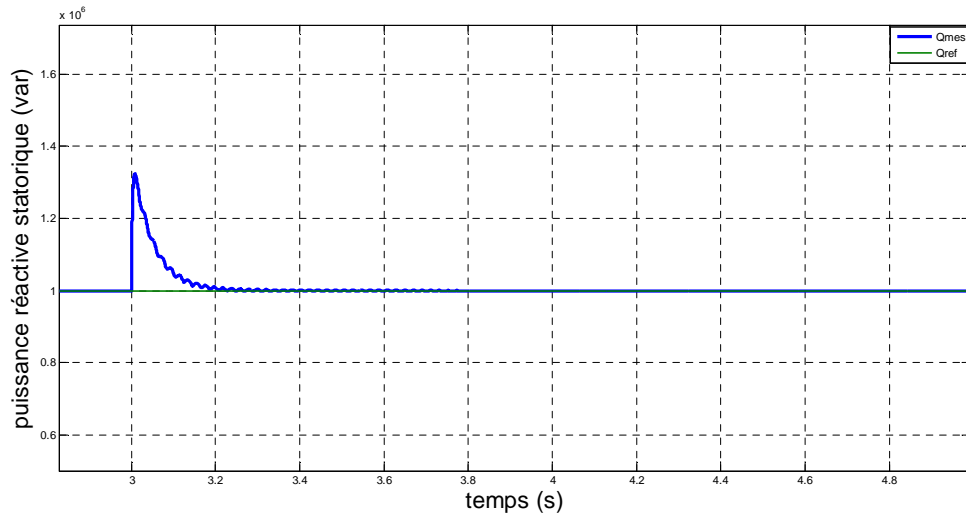
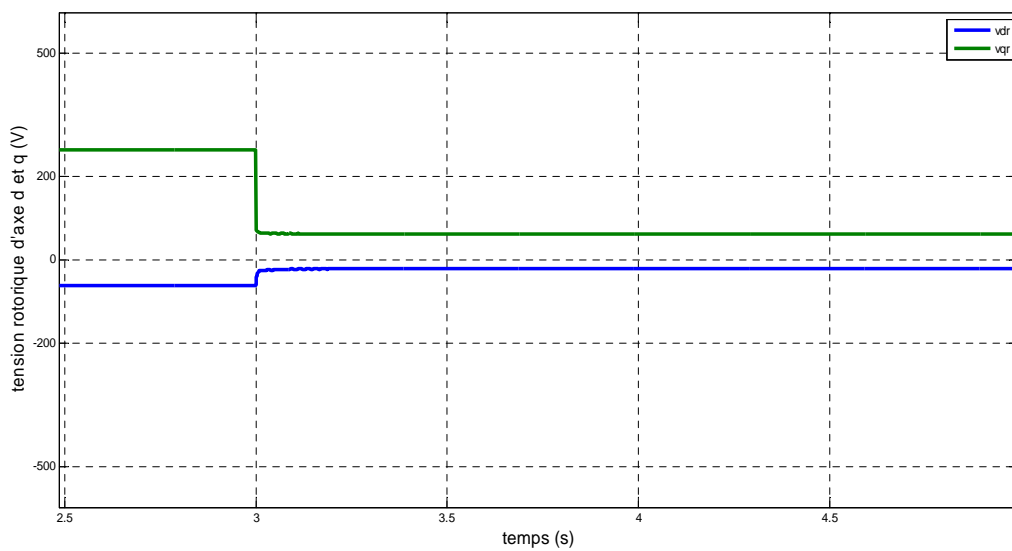


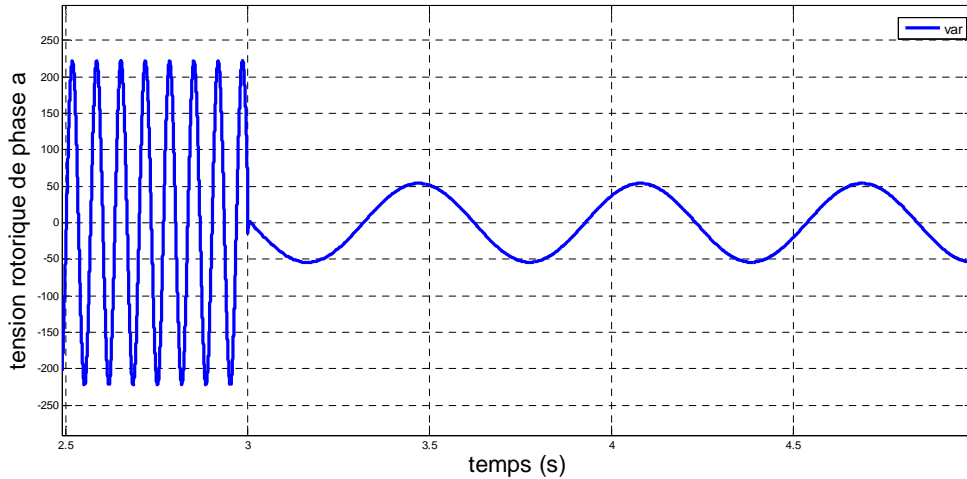
Figure III.9-a : Résultats de simulation pour l'essai de sensibilités aux perturbations de la puissance active



**Figure III.9-b: Résultats de simulation pour l’essai de sensibilités aux perturbations de la puissance réactive**



**Figure III.10-a : Courants rotoriques d’axe d et q**



**Figure III.10-b : Tension d'une phase rotorique**

### III.5 Interprétation des résultats :

Les figures (III.8-a), (III.8-b) montre que les puissances active et réactive statoriques suivent bien leurs valeurs de référence, à l'instant d'application de l'échelon de puissance active ( $t=3s$ ), une petite oscillation se produit sur la courbe de la puissance réactive, celle-ci apparaît également sur la courbe de la puissance active lors du changement de la puissance réactive à l'instant ( $t=3.8s$ ), cela est dû au couplage qui existe entre les tensions rotoriques d'axes d et q à travers le terme  $g.\omega_s.\sigma.L_r$  (voir la relation III-18).

Les figures (III.9-a), (III.9-b) montrent que les puissances mesurées (puissances active et réactive statoriques) reviennent à leurs valeurs de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement de (1050 à 1450 tr/min). Cependant à une augmentation de la vitesse du rotor correspond une augmentation des puissances (active et réactive), ces dernières reviennent à leur valeur de référence par l'action des régulateurs qui diminuent les amplitudes des tensions de commande  $v_{dr}$ ,  $v_{qr}$  comme le montrent les figures (III-10-a) et (III-10-b). On constate également que l'augmentation de la vitesse de rotation du rotor entraîne la diminution de la pulsation des tensions rotoriques en vertu de la relation ( $\omega_s = \omega + \omega_r$ ) qui permet de maintenir la fréquence des grandeurs statoriques constante.

### **III.6 Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et à la simulation de la commande vectorielle de la MADA avec orientation du flux statorique. Cette commande a permis de découpler les grandeurs du couple et du flux pour un contrôle facile et une commande en puissance de la machine.

Nous avons dans ce sens établi une relation liant les courants rotoriques d'axes d et q aux puissances statoriques réactive et active respectivement, ceci nous a permis de réaliser deux boucles de régulation de puissance en utilisant le régulateur PI. Ce dernier est simple à mettre en œuvre et offre des performances acceptables.

Enfin nous avons effectué par simulation des tests de suivi de consigne de puissance et de sensibilités par rapport aux variations de la vitesse de rotation.

Le chapitre suivant traitera de la simulation du système complet soumis à des conditions réelles de fonctionnement.

# CHAPITRE IV

Ce chapitre traite de la modélisation et de la simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. Dans un premier temps nous modéliserons le dispositif mécanique et nous présenterons l'algorithme de recherche du Point Maximum de Puissance (en anglo-saxon MPPT). Nous présenterons ensuite le modèle de l'onduleur à MLI associé au rotor de la MADA ainsi que sa stratégie de commande. Nous analyserons enfin les résultats de simulation pour un profil de vent passant par les deux régimes de fonctionnements (modes hypo et hyper synchrone).

## IV.1 Schéma synoptique du dispositif étudié :

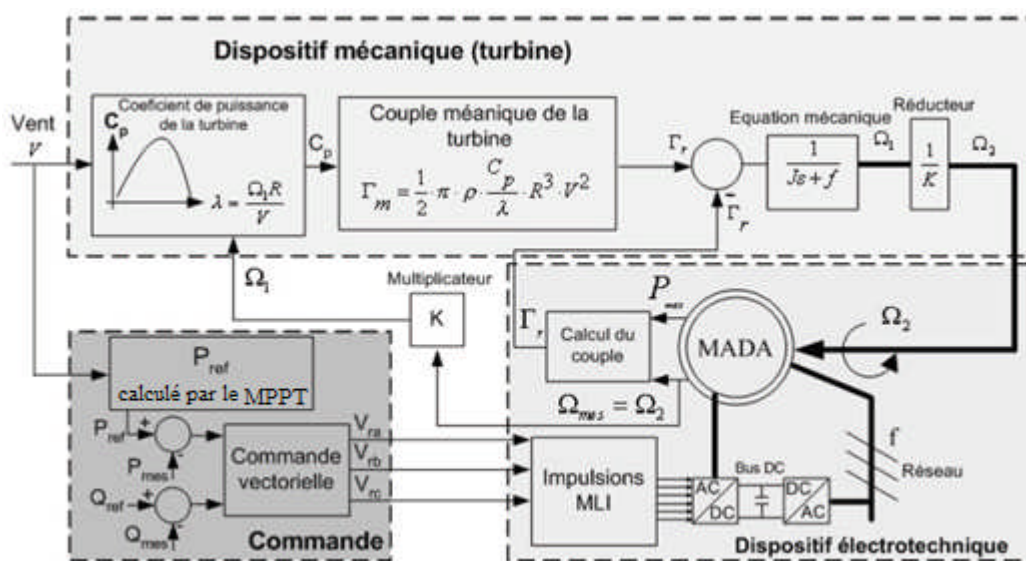


Figure IV.1 : Schéma global du système étudié

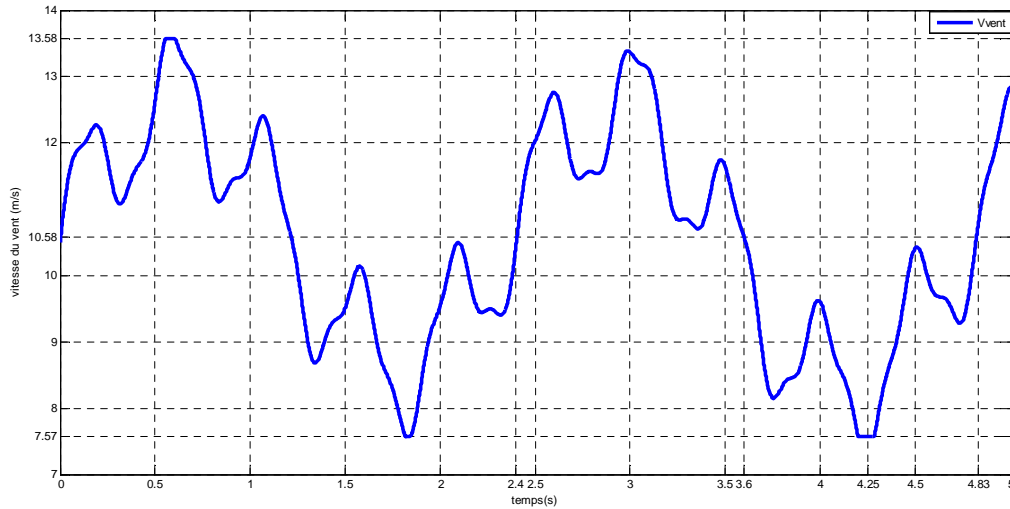
Il s'agit ici de placer la MADA dans des conditions de fonctionnement les plus proches possibles d'un système éolien. Le schéma synoptique global de la simulation réalisée est présenté sur la Figure (IV-1). Nous effectuons ci-dessous une modélisation des différentes parties du système étudié.

## IV.2 Dispositif mécanique :

### IV.2-a Modèle aérodynamique :

La vitesse du vent  $v$  peut être modélisée par une somme de plusieurs harmoniques: [17]

$$V_{vent} = 10.5 + 0.2 * \sin(1.047t) + 2 * \sin(2.665t) + \sin(12.930t) + 0.2 * \sin(36.645t) \quad (IV-1)$$



**Figure IV.2 : Vitesse du vent**

La figure ci-dessus montre que :

- Le vent est variable sur un intervalle de 5s.
- Les deux limites inférieure est supérieure englobent les deux régimes de fonctionnement (hypo et hypersynchrone) (voir annexe I).

La puissance mécanique sur l'arbre de la turbine éolienne, créée par la vitesse du vent  $v$  appliquée sur les pâles de l'éolienne de longueur  $R$ , s'exprime par : [13] [6]

$$P_t = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3}{2} \quad (\text{VI-2})$$

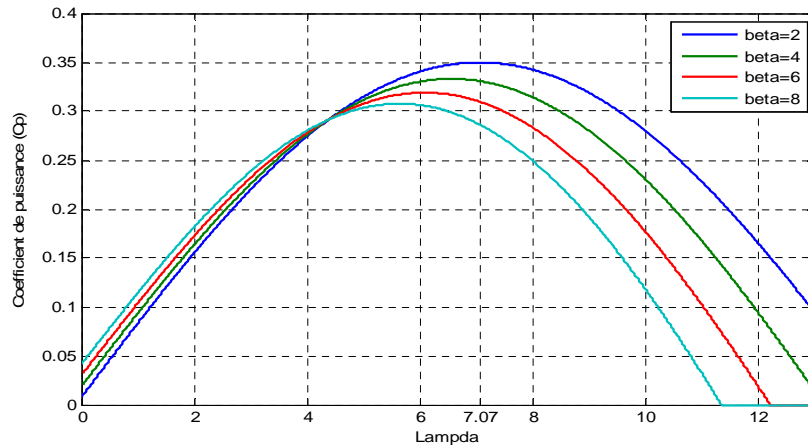
Où  $\rho$  est la densité de l'air ( $1.225\text{kg/m}^3$ ), et  $\lambda$  est la vitesse relative définie par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \quad (\text{VI-3})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend de la caractéristique de la turbine. Dans notre travail, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et de l'angle de calage des pâles  $\beta$  [18] :

$$C_p(\lambda, \beta) = [0.35 - 0.00167(\beta - 2)] \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{IV-4})$$

La figure VI-3 montre le coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différentes valeurs de  $\beta$ . Le maximum de  $C_p$  est obtenu pour  $\beta = 2^\circ$ . Ainsi, le maximum  $C_{p\max} = 0.35$  correspond à la vitesse relative  $\lambda_{\text{opt}} = 7,07$ .



**Figure IV.3 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance**

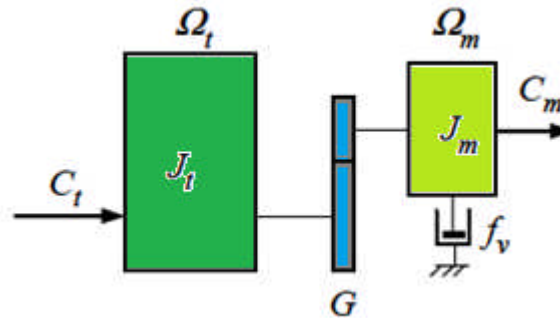
Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique  $C_t$  disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par : [13]

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{IV-5})$$

#### IV.2-b Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la

génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure (IV-4). [13]



**Figure IV.4 : Modèle mécanique de la turbine**

Avec :

- $J_t$  : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.
- $J_m$  : le moment d'inertie de la MADA.
- $f_v$  : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.
- $C_m$  : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA.
- $\Omega_m$  : la vitesse de rotation de la MADA.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) ;

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{IV-6})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{IV-7})$$

D'après la Figure (IV-4), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par : [13]

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{IV-8})$$

Le schéma bloc de la Figure (VI-5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_m$  de la

MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pâles  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la MADA. Dans notre cas on considère  $\beta$  constante et égale à  $2^\circ$ .

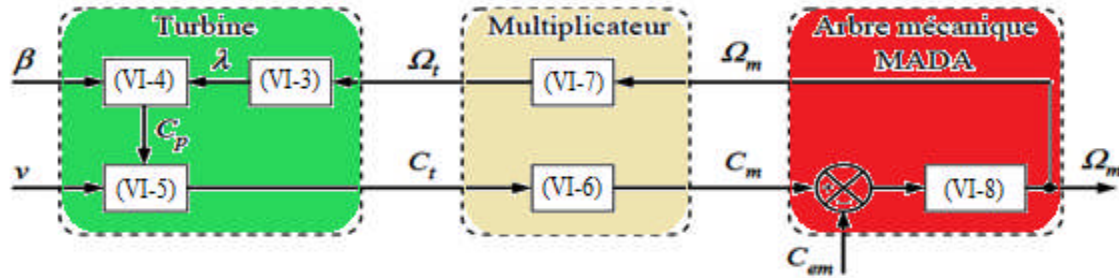


Figure IV.5 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

### IV.3 Dispositif de commande :

#### IV.3.1 Extraction du maximum de la puissance du vent :

Nous supposons que l'éolienne fonctionne en zone II (voir chapitre I) de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $v_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ .

Dans la Zone II, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle : [13] [18]

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Dans notre travail nous intéressons au contrôle sans asservissement de vitesse de rotation parce que la première méthode consiste à utiliser un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pâles. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation.

### IV.3.2 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation :

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (IV-8), nous pouvons écrire : [13]

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} = 0 \tag{IV-9}$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ( $f_v \cdot \Omega_m = 0$ ) par rapport au couple mécanique  $C_m$ , on peut alors écrire :

$$C_m = C_{em} \tag{IV-10}$$

La Figure (VI-6) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation. [13]

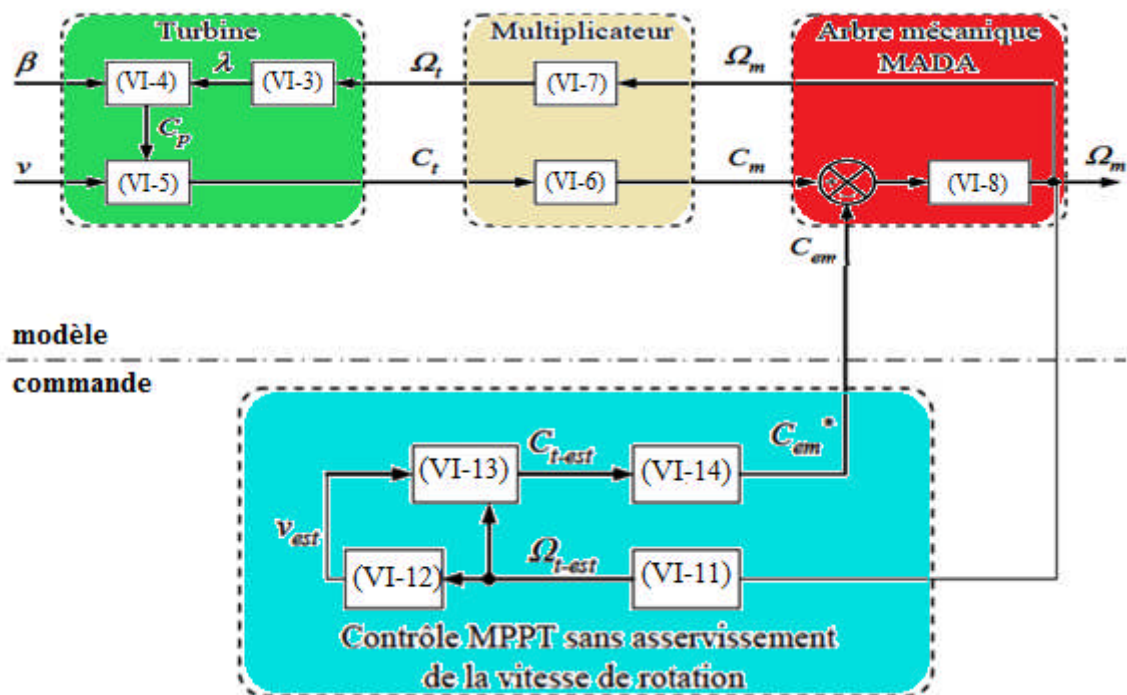


Figure IV.6 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée  $\Omega_{t-est}$ , est obtenue à partir de la

mesure de la vitesse de rotation de la MADA : [13]

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_t}{G} \quad (IV-11)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée  $v_{est}$ , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$v_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\lambda} \quad (IV-12)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \cdot v_{est}^3 \quad (IV-13)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$C_{em}^* = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (IV-14)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum  $C_{pmax}$ . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par:

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega_m^2 \quad (IV-15)$$

Où  $K$  est une constante définie par :

$$K = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (IV-16)$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone II) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la MADA.

### IV.3.3 Commande du convertisseur coté rotor (RSC) :

Le RSC (Rotor Side Converter) sera commandé par la méthode de séparation des puissances (régulateurs PI) pour imposer une puissance active statorique optimale à la GADA, calculée par la commande MPPT, et un facteur de puissance unitaire au stator de la GADA. Le schéma de principe de cette commande est illustré dans la figure (IV-7). [13]

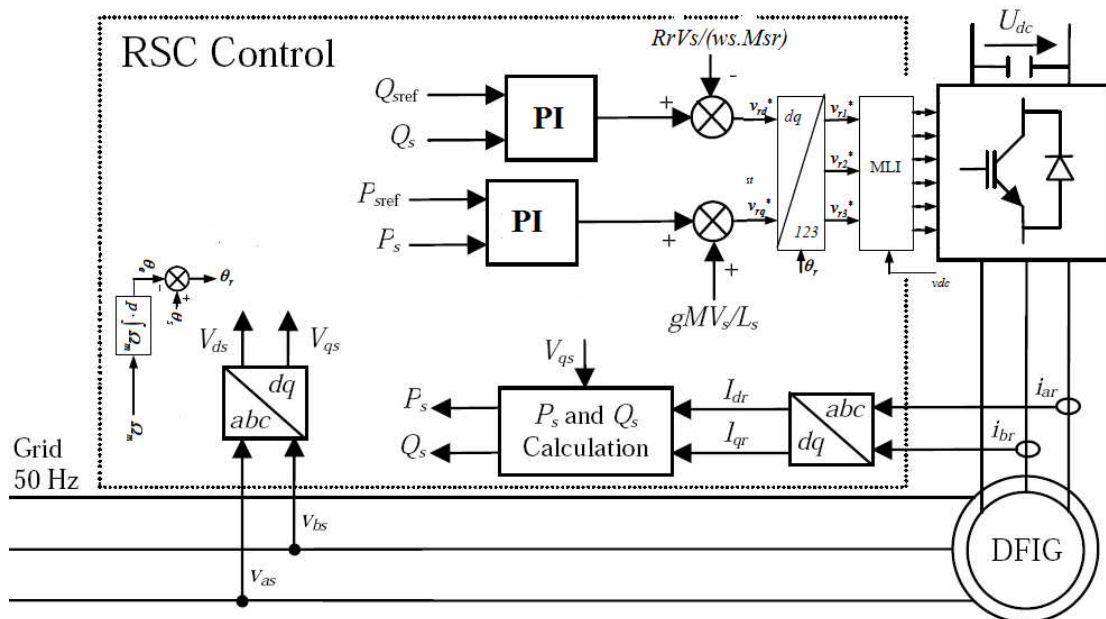


Figure IV.7 : Schéma principe de la commande du RSC

## IV.4 Dispositif de puissance :

### IV.4.1 Association onduleur-MADA :

Le réglage de la vitesse du rotor de la MADA se réalise par une tension d'amplitude et de fréquence réglable, pour cela il faut alimenter la MADA par un onduleur de tension. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. Une structure intéressante est celle utilisant la technique de modulation des largeurs d'impulsions, elle consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteur de l'onduleur. [19]

### IV.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé à deux niveaux est présenté par la figure (IV-9), il est constitué de trois cellules de commutation. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

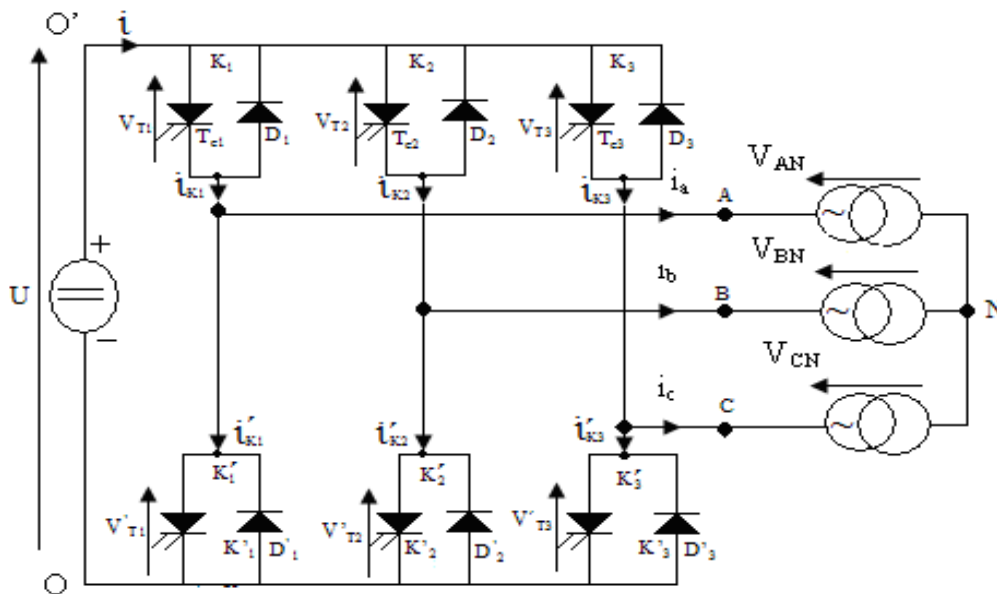


Figure VI.9 : Structure de l'onduleur triphasé

La commande est complémentaire, soit  $(C_1, C_2, C_3)$ , les commandes des interrupteurs associée respectivement à  $(K_1, K_2, K_3)$  donc  $(\bar{C}_1, \bar{C}_2, \bar{C}_3)$ , les commandes des interrupteurs associée respectivement à  $(K'_1, K'_2, K'_3)$ .

$$\text{On a } \begin{cases} V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} & (a) \\ V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} & (b) \\ V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} & (c) \end{cases} \quad (IV-17)$$

Le système est en équilibre  $\Rightarrow V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$

$$(a)-(c) \Rightarrow V_{AB} - V_{CA} = 3V_{AN}$$

$$(c) - (b) \Rightarrow V_{CA} - V_{BC} = 3V_{CN}$$

$$(b)- (a) \Rightarrow V_{BC} - V_{AB} = 3V_{BN}$$

On peut écrire alors :

$$3 \begin{Bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V_{AB} - V_{CA} \\ V_{BC} - V_{AB} \\ V_{CA} - V_{BC} \end{Bmatrix} \quad (\text{IV-18})$$

On a aussi :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ V_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ V_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \quad (\text{IV-19})$$

Si  $C_1=1$  alors  $V_{AO} = U$

Sinon si  $C_1=0$  alors  $V_{AO} = 0$

Donc  $V_{AO} = C_1 \cdot U$

De même pour  $V_{BO}$ , ainsi que  $V_{CO}$

$$V_{BO} = C_2 \cdot U$$

$$V_{CO} = C_3 \cdot U$$

$$\begin{cases} V_{AB} = C_1 \cdot U - C_2 \cdot U \\ V_{BC} = C_2 \cdot U - C_3 \cdot U \\ V_{CA} = C_3 \cdot U - C_1 \cdot U \end{cases} \quad (\text{IV-20})$$

On peut écrire alors:

$$\begin{cases} V_{AB} - V_{CA} = 2C_1 \cdot U - C_2 \cdot U - C_3 \cdot U = 3V_{AN} \\ V_{BC} - V_{AB} = -C_1 \cdot U + 2C_2 \cdot U - C_3 \cdot U = 3V_{BN} \\ V_{CA} - V_{BC} = -C_1 \cdot U - C_2 \cdot U + 2C_3 \cdot U = 3V_{CN} \end{cases} \quad (\text{IV-21})$$

Alors le système devient :

$$\begin{Bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{Bmatrix} = \frac{U}{3} \begin{bmatrix} 2C_1 & -C_2 & -C_3 \\ -C_1 & 2C_2 & -C_3 \\ -C_1 & -C_2 & 2C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV-22})$$

Donc :

$$V_{AN} = \frac{U}{3}[2C_1 - C_2 - C_3]$$

$$V_{BN} = \frac{U}{3}[-C_1 + 2C_2 - C_3]$$

$$V_{CN} = \frac{U}{3}[-C_1 - C_2 + 2C_3]$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI, qui consiste à choisir une fréquence de commutation pour les interrupteurs et à fixer à l'intérieur de la période de commutation les intervalles de conduction des interrupteurs. Ce type de commande consiste à envoyer des ordres d'allumage et d'extinction des interrupteurs de l'onduleur à chaque intersection de l'onde de modulation (signal triangulaire) et de l'onde de référence (signal désiré, dans notre cas sinusoïdal) ; voir figures (IV-10-a) et (IV-10-b). Les tensions simples à la sortie de l'onduleur sont montrées dans la figure (IV-10-c) pour une tension du bus continu de 1200V.

La commande est caractérisée par :

- L'indice de modulation « m » égale au rapport ( $f'/f$ ) des fréquences de modulation et de référence.

$$m = \frac{f'}{f} \quad (\text{IV-23})$$

Tel que :

$f'$  : fréquence de l'onde de modulation  $V_p$ .

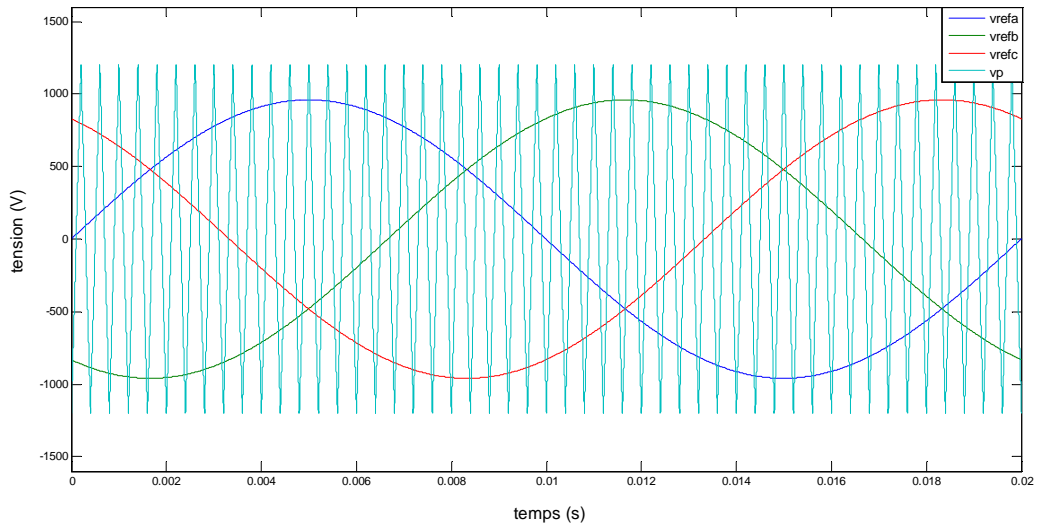
$f$  : fréquence de l'onde de référence  $V_{ref}$ .

- Le coefficient de réglage en tension « r », égal au rapport de l'amplitude de la référence à la valeur « crête » de l'onde de modulation.

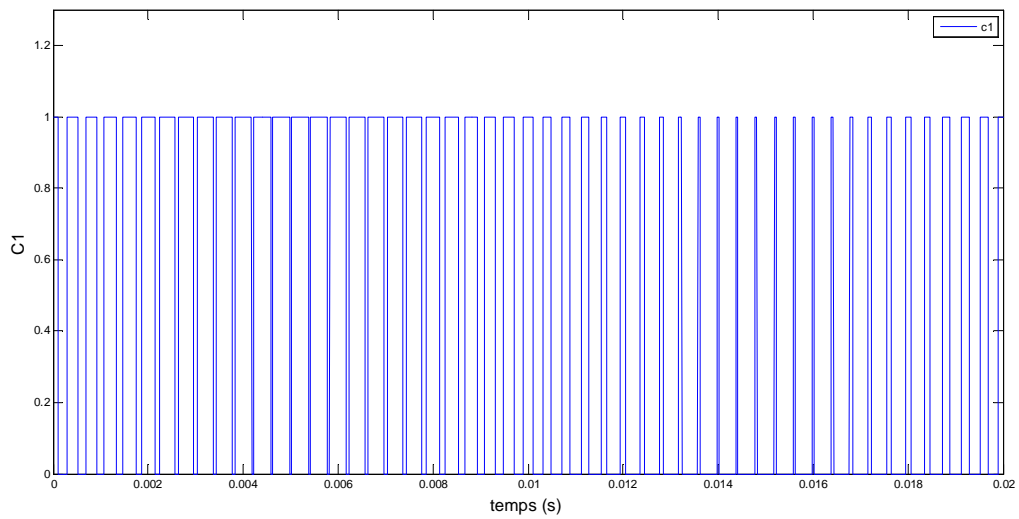
$$r = \frac{\hat{V}_{ref}}{\hat{V}_p} \quad (\text{IV-24})$$

$\hat{V}_{ref}$  : valeur crête de l'onde de référence.

$\hat{V}_p$  : valeur crête de l'onde de modulation.



**Figure IV.10-a Tensions de référence et de la porteuse**



**Figure IV.10-b Signaux de commande d'un bras de l'onduleur**

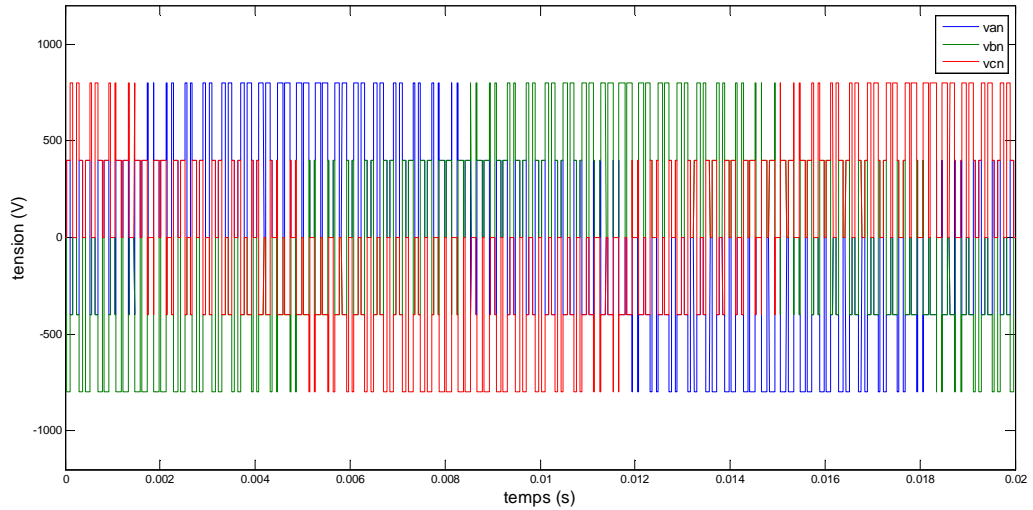


Figure IV.10-c : Tension simples à la sortie de l'onduleur à MLI

IV.5 Schéma de simulation :

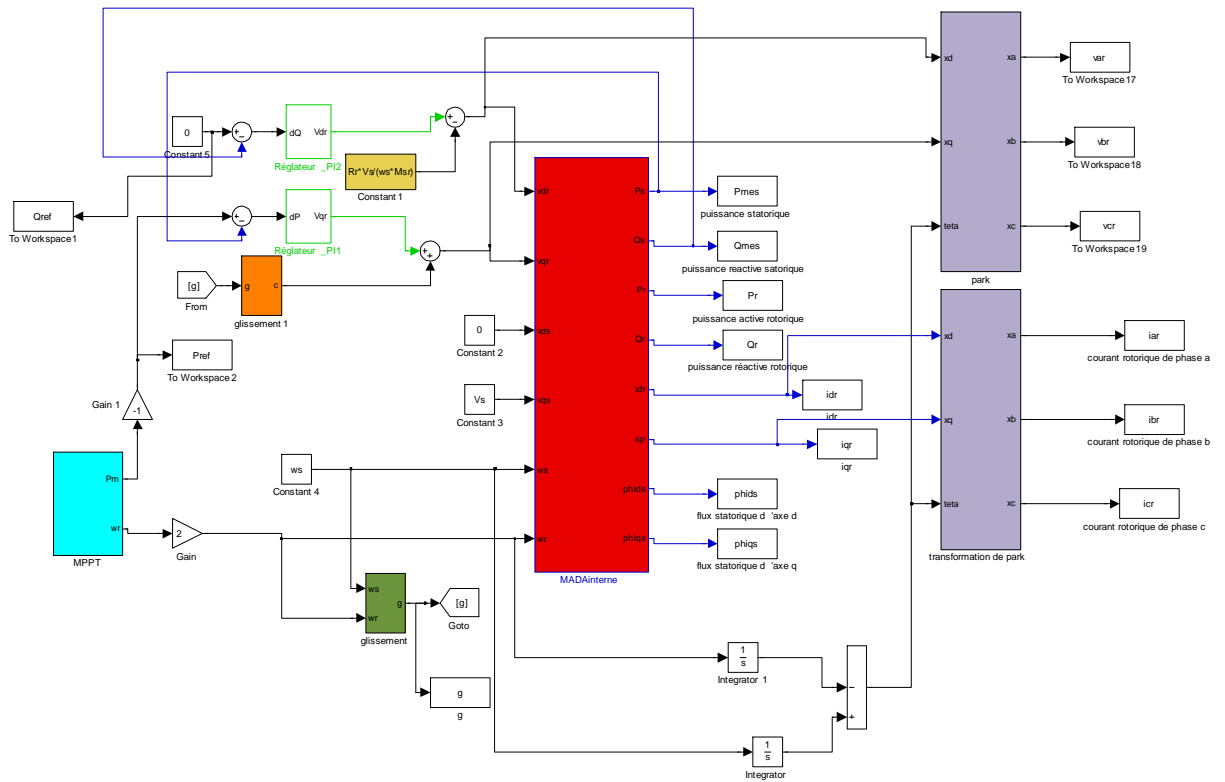
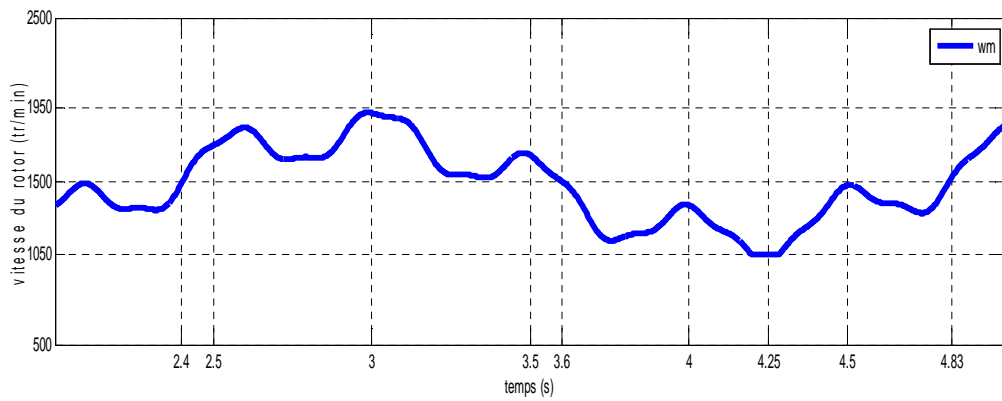
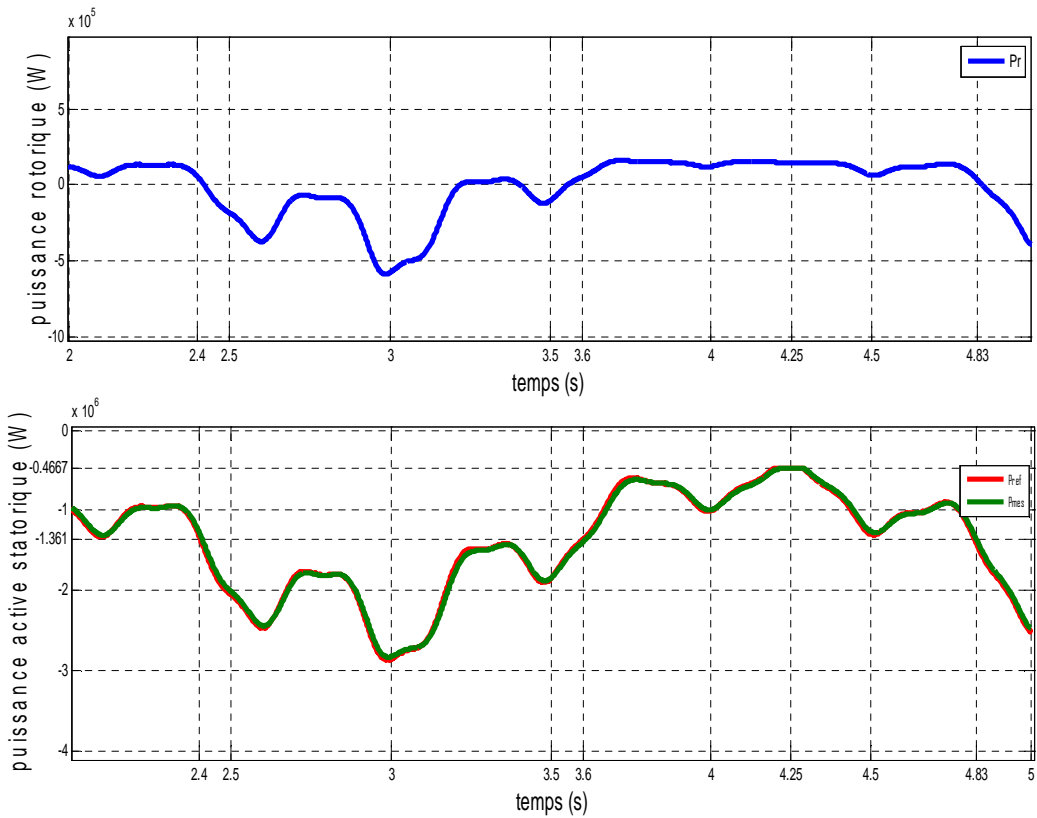


Figure IV.11 : Schéma de simulation du système global

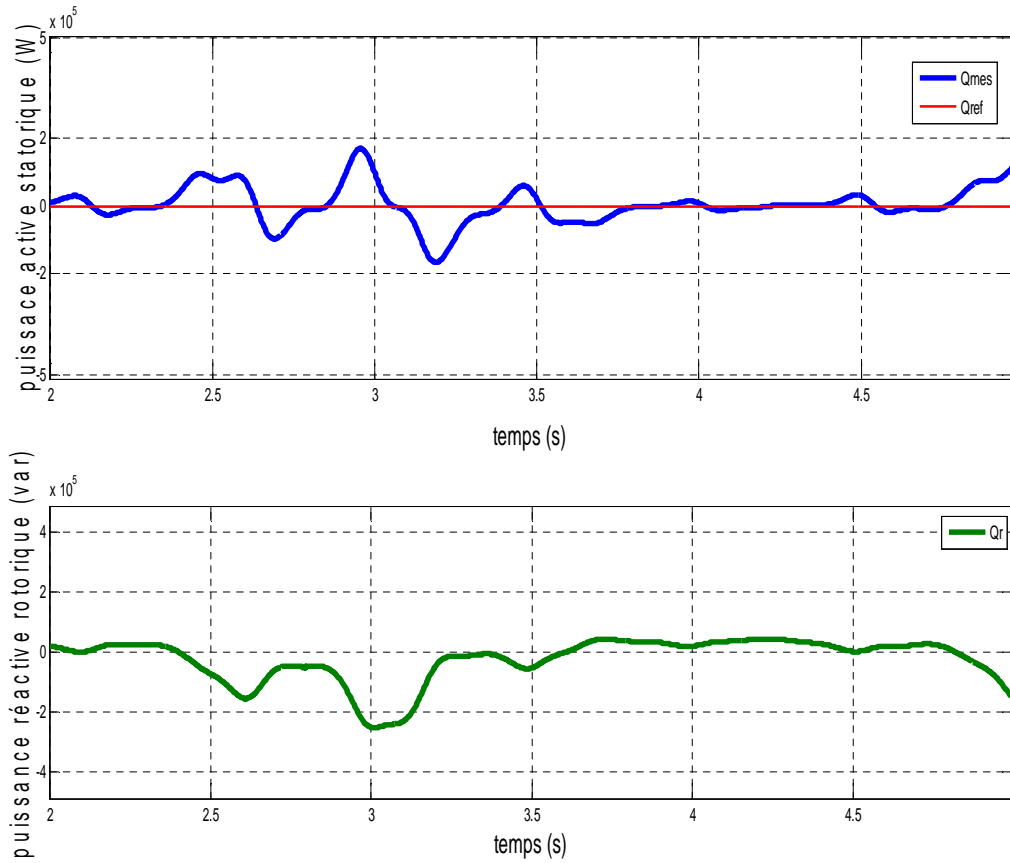
**IV.6 Résultats de simulation :**



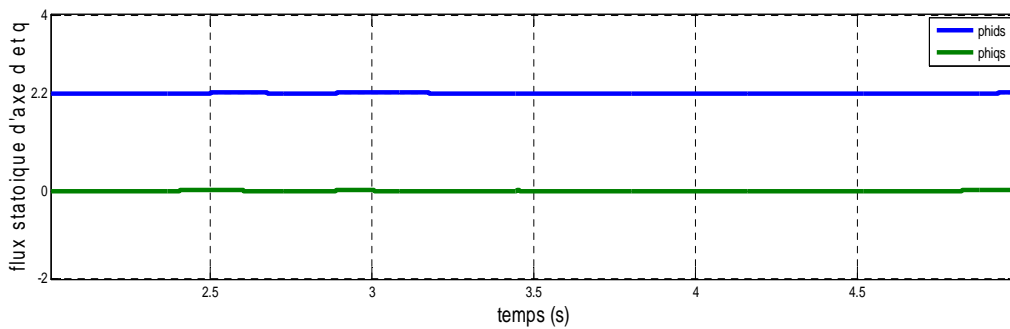
**Fig IV.12-a : Vitesse mécanique de la MADA**



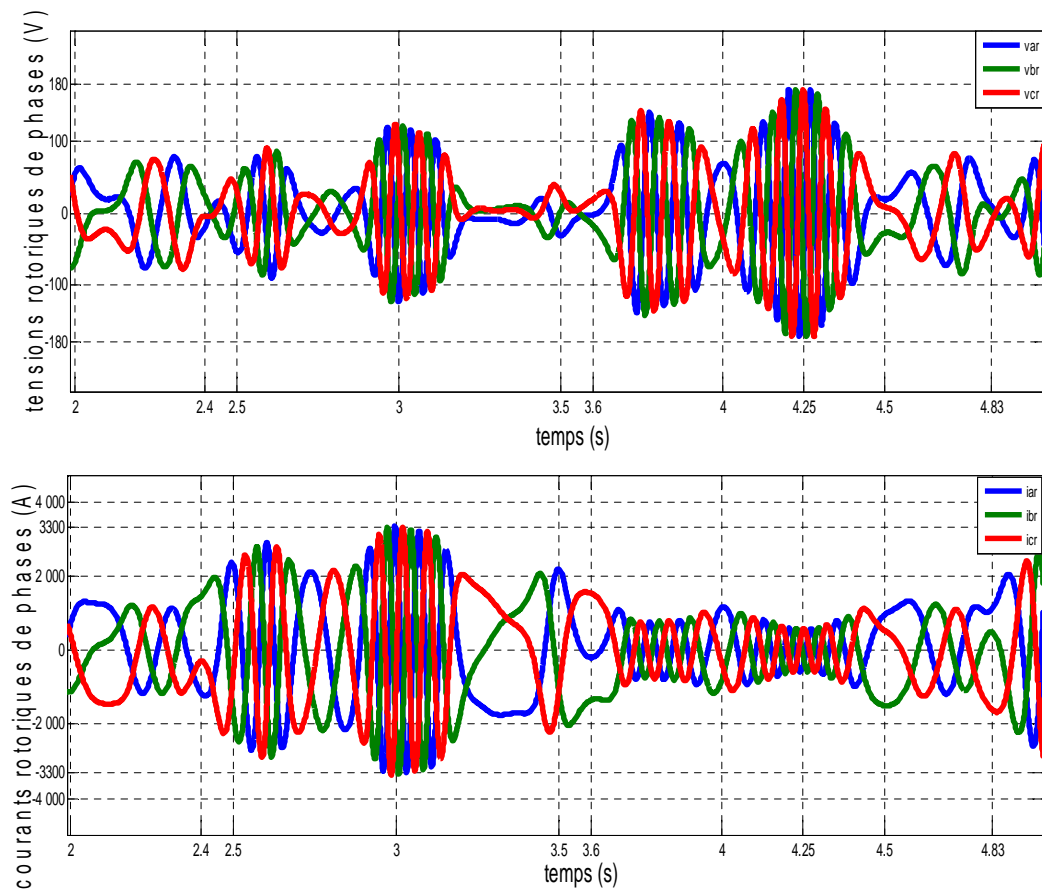
**Fig IV.12-b : Puissances actives statorique et rotorique**



**Fig IV.12-c : Puissances réactives statorique et rotorique**



**Fig IV.12-d : Flux statorique d'axe d et q**



**Figure VI.12-e : Tensions et courants rotoriques de phase**

**Figure VI.12 (a-e) : Résultats de simulation du système global**

#### **IV.7 Interprétation des résultats :**

La figure (IV.12-a) montre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor de la MADA (en tr/mn) suite à la variation de la vitesse du vent, d'après cette figure la vitesse mécanique du rotor varie entre (1050 tr/mn et 1950 tr/mn) ce qui représente  $\pm 30\%$  de la vitesse du synchronisme (1500 tr/mn), c'est la zone linéaire du fonctionnement de la MADA (voir zone II chap I), nous remarquons sur la figure (IV.12-b) que la puissance active statorique suit parfaitement la puissance de référence (calculée à partir du MPPT) qui représente la puissance mécanique développée par la turbine, cela valide la régulation mise en place.

Nous constatons aussi que pour des vitesses de rotation du rotor comprises entre (1050 tr/mn et 1500 tr/mn) la puissance  $P_r$  rotorique est positive tandis que la puissance statorique est négative. Cela indique que le rotor absorbe de la puissance active et le stator fournit de la puissance au réseau, c'est le fonctionnement hypo synchrone que les machines asynchrones à cage ne peuvent pas avoir. Au-delà de (1500 tr/mn) c-à-d pour ( $\Omega_r > 1500$  tr/mn), on voit bien que la puissance active rotorique  $P_r$  change de signe et devient négative. Le réseau reçoit donc de l'énergie du stator et du rotor de la MADA c'est le fonctionnement hyper synchrone. La figure (IV.12-c) montre que  $Q_s$  est régulée à sa valeur de référence imposée ( $Q_{ref} = 0$ ) ce qui permet de garder un facteur de puissance unitaire. Cependant des fluctuations surviennent quand  $P_s$  subit d'importantes variations, cela s'explique par l'existence de couplage entre  $v_{dr}$  et  $v_{qr}$  par le terme  $g.\omega_s.\sigma.Lr$  (équation (III-18)), nous remarquons aussi que lorsque  $Q_s$  s'annule  $Q_r$  ne s'annule pas afin de fournir de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la MADA.

D'après la figure (IV-12-d) le flux statorique d'axe q est nul ce qui vérifie l'hypothèse de l'orientation du flux statorique d'axe q ( $\varphi_{qs} = 0$ ), cependant le flux statorique d'axe d ( $\varphi_{ds}$ ) est constant car la MADA est connectée à un réseau stable.

La figure (IV-12-d) montre que les tensions et les courants rotoriques de la MADA ont une fréquence et une amplitude variable, en effet les pulsations rotoriques sont régies par l'équation  $\omega_s = \omega + \omega_r$ , donc si  $\omega$  change ce qui se traduit par un changement de la vitesse du rotor,  $\omega_r$  (pulsation des courants rotoriques) change aussi d'une façon à garder  $\omega_s$  constante car elle est imposée par le réseau. On peut expliquer le changement d'amplitude des tensions et des courants rotoriques comme suit ;

Lorsque la puissance statorique change le régulateur doit agir sur les tensions de commande  $v_{dr}$  et  $v_{qr}$  afin de ramener la puissance active statorique  $P_s$  à sa valeur de référence et comme  $v_{dr}$  et  $v_{qr}$  sont liées aux courants rotoriques  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  par la relation (III-17) donc ils changent d'amplitude aussi.

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit et modélisé les différentes parties constituant la chaîne de conversion électromécanique basé sur une MADA. Nous avons commencé par le modèle aérodynamique et mécanique de la turbine, nous avons considéré que l'éolienne se situe dans sa zone de fonctionnement optimale permettant d'extraire le maximum de puissance

disponible dans le vent par le contrôle MPPT. Nous avons décrit la stratégie de commande du CCR assurant un contrôle indépendant des puissances actives et réactives statoriques.

Enfin, afin de valider la modélisation nous avons effectué des simulations pour un profil de vent aléatoire passant par les deux points de fonctionnement hypo et hyper synchrone. Les résultats obtenus ont montré que les puissances active et réactive du système peuvent être contrôlées de façon indépendante tout en garantissant une puissance active optimale fournie au réseau électrique et un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire.

## Conclusion générale :

L'objectif préalablement défini dans ce travail consistait à étudier la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à base d'une MADA.

Nous avons rappelé dans un premier chapitre les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et nous avons dressé un état de l'art sur les différentes associations machines électriques-convertisseurs pouvant être utilisées dans une éolienne.

Le deuxième chapitre a été consacré à la construction du modèle de PARK de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un repère diphasé lié au champ tournant.

Le troisième chapitre comporte la commande vectorielle de la MADA dans le but de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator et le réseau, des régulateurs de type proportionnel intégral (PI) ont été utilisés. Des tests de simulations ont été effectués afin d'analyser les performances de ces régulateurs par rapport au suivi de consigne et aux perturbations.

Le quatrième chapitre avait comme objectif de modéliser le dispositif complet et de le tester par simulation dans des conditions proches de la réalité. Nous nous sommes intéressés à modéliser la turbine éolienne, car bien que cela relève de la mécanique, elle constitue néanmoins un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique mécanique. Nous avons par la suite présenté l'algorithme de recherche du point maximum de puissance (MPPT) et le modèle de l'onduleur à MLI associé au rotor de la MADA

Des résultats de simulations pour un profil de vent passant par les deux modes de fonctionnements (hypo et hyper synchrone) sont présentés et discutés.

Il est à signaler que les résultats obtenus correspondaient à ceux attendus et des interprétations ont été proposées à la fin du chapitre IV. Par ailleurs ces résultats ont été comparés avec ceux obtenus par d'autres travaux existants dans la littérature technique.

Nous avons traité la commande en puissance de la MADA par deux régulateurs (PI) externes de puissance. Nous aurions pu adjoindre des régulateurs internes de courants pour obtenir moins d'oscillations en régime transitoire, comme nous aurions pu proposer d'autres types de régulateurs de puissance (RST, LQG, régulateurs non entiers, ...etc).

Nous n'avons pas étudié l'influence de l'onduleur sur les performances globales de l'ensemble car l'utilisation de son modèle instantané conduit à des temps de simulation importants (step time petit et stop time grand). La solution est d'utiliser le modèle moyen.

Les études pouvant être envisagées comme suite immédiate à notre travail sont nombreuses et variées, on peut citer :

- Utilisation d'un convertisseur (redresseur+onduleur) autorisant la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau.
- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte la résistance de la phase statorique et la saturation magnétique.
- Contrôle du système par les techniques d'intelligence artificielle.
- Intégration éventuelle d'un système de stockage.
- Intégration mixte de la MADA avec le photovoltaïque dans un parc éolien (système hybride).
- Etude des perturbations inhérentes au couplage du dispositif avec le réseau.
- Réaction de la génératrice vis-à-vis des déséquilibres du réseau, des creux de tension et des fluctuations.
- Interaction avec les autres génératrices du réseau, supervision d'une ferme éolienne.
- Réalisation expérimentale d'un système de puissance réduite.

## Bibliographie

[1]: Frédéric Poitiers, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

[2]: Boyette Armand, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[3]: Nicolas Laverdure, « Intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 2005.

[4]: Redjem Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister à l'université Mentouri de Constantine, 2009.

[5]: Philippe Leconte, Marc rapin, Edmond Szechenyi, « Eoliennes », document pédagogique technique de l'ingénieur « N° de la fiche doc : BM4640doc ».

[6] : Vincent Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi-sources à base d'éolienne et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat de l'université d'Arts et Métiers, Paris, « N° : 2008-ENAM-0027 ».

[7] : Mekkaoui Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Mémoire de magister à l'université de Batna, 2004.

[8] : Arnaud Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat de l'université de Lille, 2007.

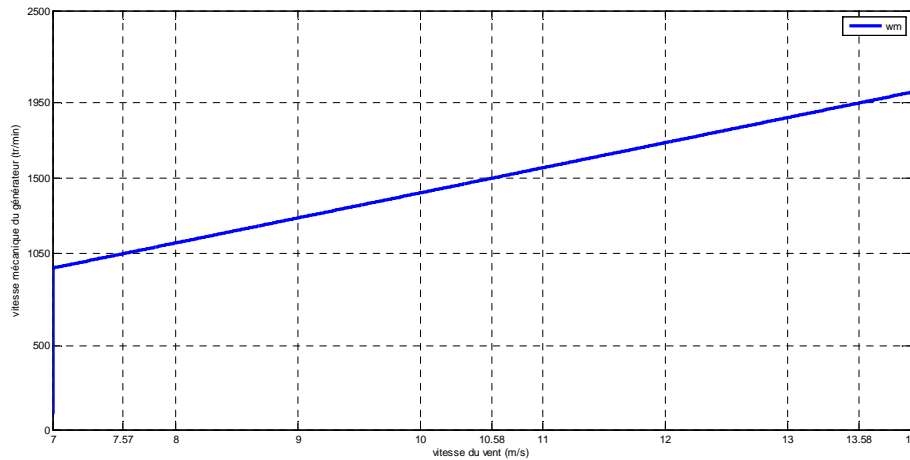
[9] : H. Sediki : cours de commande II master ETH, « Chap1 : Modélisation et identification de la machine asynchrone triphasé », université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

[10] : Rachid Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », Mémoire de magister à l'UMBB, 2008.

- [11] : Théodor Wildi, Gilbert Sybille, « Électrotechnique », édition de boeck, 4<sup>ème</sup> édition, 2005
- [12] : JP CARON et JP HAUTIER, « Modélisation et commande de la machine asynchrone » Editions TECHNIP, 1992.
- [13] : Arnaud Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2010.
- [14] : Abbas Mourad et Mechentel Mohamed, « Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux Application à l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur, ENP, 2006.
- [15] : Olympo Anaya-Lara, « Wind energy generation : modeling and control », Edition John Wiley and Sons, 2009
- [16] : Philippe Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles, 2<sup>ème</sup> édition, Paris 1987.
- [17] : E. S. Abdin, W. Xu, « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit», *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 15, N° 1, March 2000.
- [18] : Elaimani Selma, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille et de l'université des sciences et de la technologie de Lille ,2004.
- [19] : Morissanda Kéita, « Techniques de commande des convertisseurs », projet d'application pour l'obtention de la maîtrise en technologie des systèmes, à l'école de technologie supérieure de Québec, 1999.
- [20] : Patrick Bastard, Daniel Fargue, Bernard Mathieu, Muriel Nicolas « Electricité voyage au cœur du système », Editions Eyrolles, 2000.

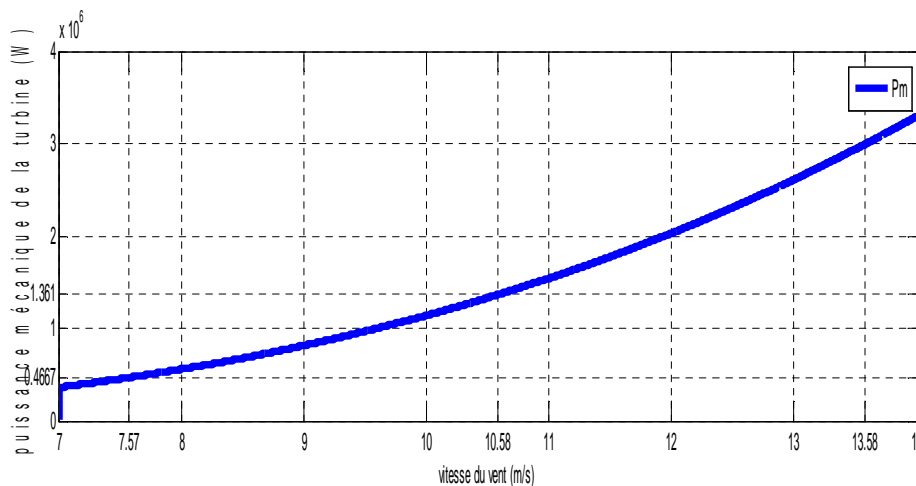
## Dimensionnement de l'éolienne :

### 1-limite de fonctionnement :



De la figure ci-dessus, la vitesse du générateur correspondant à + 30% de la vitesse de synchronisme est:  $1500+(0,3*1500)=1950$  tr/min, elle est atteinte lorsque la vitesse du vent est de 13.58 m/s ( limite de fonctionnement hypersynchrone). Pour la limite du fonctionnement hyposynchrone la vitesse du générateur est de -30% du synchronisme, soit :  $1500-(0,3*1500)=1050$  tr/min à laquelle correspond une vitesse de vent de 7,57 m/s

### 2-Puissance mécanique délivrée par la turbine:



De la figure ci-dessus nous déduisons les deux puissances délivrées correspondant aux deux limites de fonctionnement (hypo et hypersynchrone).

**Limite hyposynchrone (0.4667 MW, à 7.57m/s)**

**Limite hypersynchrone (3 MW, à 13.58m/s)**

## I. Paramètres de la turbine éolienne : [13]

- Nombre de pales = 3 ;
- Diamètre d'une pale :  $R = 45\text{m}$  ;
- Gain du multiplicateur :  $G = 100$  ;
- Inertie de la turbine  $J = 1.4 \text{ Kg.m}^2$  ;

## II. Paramètres de la MADA : [13]

- $P_n = 3 \text{ MW}$  ;
- $U_s = U_r = 690\text{V}$  ;
- $p = 2$  ;
- $f = 50\text{Hz}$  ;
- Résistance statorique :  $R_s = 2,97\text{m}\Omega$  ;
- Inductance statorique :  $L_s = 12.2\text{mH}$  ;
- Résistance rotorique :  $R_r = 3,82\text{m}\Omega$  ;
- Inductance rotorique :  $L_r = 12.2\text{mH}$  ;
- Inductance Mutuelle :  $M = 12,12\text{H}$  ;
- Inertie de la MADA :  $J = 114 \text{ Kg.m}^2$  ;
- Coefficient des frottements :  $f = 10 \text{ Nm.s/rd}$  ;

## III. Paramètres de l'onduleur : [13]

- Fréquence de commutation des IGBT = 2 kHz ;
- Valeur crête de l'onde de référence ( $\hat{V}_{ref}$ ) = 960 volts ;
- Valeur crête de l'onde de modulation ( $\hat{V}_p$ ) = 1200 volts ;
- Le coefficient de réglage en tension ( $r$ ) = 0.8 ;

**Résumé :**

Le travail présenté dans ce mémoire porte essentiellement sur l'étude de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à base d'une machine asynchrone à double alimentation. L'éolien est utilisé comme un support d'énergie entraînant le rotor de la machine de 3 MW.

Une première étude est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans un deuxième temps une modélisation et une simulation de la commande vectorielle de la MADA avec orientation du flux statorique permettant de résoudre le problème de couplage entre les grandeurs du couple et du flux pour un contrôle facile et une commande en puissance de la machine.

La dernière partie est accordée à la modélisation du dispositif mécanique (turbine), la présentation de l'algorithme de recherche du MPPT (point maximum de puissance), et la modélisation de l'onduleur à MLI associé au rotor de la MADA ainsi que sa stratégie de commande.

Enfin, afin de valider la modélisation nous avons effectué des simulations pour un profil du vent aléatoire passant par les deux modes de fonctionnements hypo et hyper synchrone. Nous n'avons pas étudiés l'influence de l'onduleur sur les performances globales de l'ensemble car l'utilisation de son modèle instantané conduit à des temps de simulation importants (step time petit et stop time grand). La solution est d'utiliser le modèle moyen.