



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Article I. Ministère de l'enseignement Supérieur



Article II. Et de la Recherche scientifique

Université d'EL-Oued

Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude  
En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**  
Domaine: Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité : Machine Électriques

## Thème

**commande sans capteur de la  
machine asynchrone à double  
alimentation**

**Réaliser par:**

- MAAMRI Abdel ouahab
- MADANI Hamza
- SEGHIERI Brahim

**Diriger par:**

Dr. SERHOUD Hicham

2020/2021

## *Remercîment*

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions Monsieur S.HICHAM qui a suivi ce travail, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire, et tous les conseils qu'il nous a prodigués pendant toute la durée de ce travail malgré ses nombreuses occupations.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

Nous sommes reconnaissantes envers nos enseignants auxquels nous devons notre formation en électrotechnique.

Enfin, nous ne pourrions terminer ces remerciements sans oublier nos familles pour leur aide, compréhension, encouragement et soutien, qu'elles nous ont apportées durant nos études et à tous nos amis.

## *Dédicace*

Je dédie ce travail, à mes parents, à  
mes frères, à tous mes  
amis, à tous mes collègues, et à tous  
ceux qui ont contribué de près ou de  
loin à ma formation.

A toute la promotion 2021  
d'Electrotechnique.

Abdel ouahab

## *Dédicace*

Je dédie humblement ce modeste travail  
A mes très chers  
parents qui ont intensément vécu chaque  
moment de ce  
parcours avec dignité, générosité et  
esprit de sacrifice.

Je dédie ce travail également:

A mes très chers frères  
A tous mes amis  
A tous ce qui m'aiment et que j'aime  
A toute la promotion 2021  
d'Electrotechnique.

HAMZA

## *Dédicace*

Je dédie ce travail, à mes parents, à mes  
frère, à tous mes  
amis, surtout Alla AZZOUZ, Brahim  
DJEBALI et Med Ikbal MOUSSAOUI  
à tous mes collègues, et à tous ceux qui  
ont contribué  
de près ou de loin à ma formation.

A toute la promotion 2021  
d'Electrotechnique.

**BRAHIM**

## **Résumé:**

Le présent travail est consacré à une commande vectorielle sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) par l'utilisation de l'observateur adaptatif mode glissant intégrée à un système éolien. L'observateur mode glissant (SMO) prouvé par le critère de Lyapunov pour estimer la position du rotor et la vitesse afin utilisée dans le contrôle vectoriel du GADA, la stratégie de contrôle pour le contrôle de la puissance est développée par l'application de la technique d'orientation de flux. Les performances et la robustesse de la commande sans capteur de la GADA à vitesse variable sont analysées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

## **Mots clés:**

Machine Asynchrone à Double Alimentation, Commande sans capteur, observateur adaptatif - mode glissant .MPPT

## **Abstract**

This work investigates the use of adaptive sliding-mode observer for sensorless power control of double fed induction machine (DFIG) in wind energy conversion systems. The sliding-mode observer (SMO) proved by Lyapunov's criterion which used to estimate the rotor position and speed information for the vector control of the DFIG, the control strategy for flexible power flow control is developed by applying flux oriented vector control (technique). The analyzed and simulation results in MATLAB/ Simulink platform confirmed the good dynamic performance of this sensorless control for DFIG based variable speed wind turbines.

## **Keywords**

Doubly fed induction generator, sensorless control, adaptive sliding-mode observer, maximal wind energy capture.

# Sommaire

**REMERCIEMENT**

**DEDICACE**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES FIGURES**

**INTRODUCTION GENERALE** ..... )

## CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES ENERGIES EOLIENNE

<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.Énergie renouvelable:</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3.Histoire</b> .....	<b>5</b>
<b>I.4.Aperçu général</b> .....	<b>6</b>
<b>I.4.1. Énergie solaire</b> .....	<b>7</b>
<b>I.4.2. Énergie géothermique</b> .....	<b>7</b>
<b>I.4.3. Biomasse</b> .....	<b>7</b>
<b>I.4.4. Énergie hydraulique</b> .....	<b>8</b>
<b>I.4.5. Énergie éolienne</b> .....	<b>8</b>
<b>I.5. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne</b> .....	<b>9</b>
<b>I.5.1. Définition de l'énergie éolienne</b> .....	<b>9</b>
<b>I.5.2. Principaux composants d'une éolienne</b> .....	<b>10</b>
<b>I.6. Les différents types d'éoliennes</b> .....	<b>11</b>
<b>I.6.1. Eoliennes à axe vertical</b> .....	<b>11</b>
<b>I.6.2. Eoliennes à axe horizontal</b> .....	<b>12</b>
<b>I.7.Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</b> .....	<b>12</b>
<b>I.7.1. Loi de BETZ</b> .....	<b>12</b>
<b>I.7.2. Production d'énergie mécanique</b> .....	<b>15</b>
<b>I.8. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne</b> .....	<b>16</b>
<b>I.8.1. Bilan des forces sur une pale</b> .....	<b>16</b>
<b>I.8.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne</b> .....	<b>17</b>
<b>I.8.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"</b> .....	<b>17</b>
<b>I.8.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.1. Fonctionnement à vitesse fixe</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9.2. Fonctionnement à vitesse variable</b> .....	<b>19</b>
<b>I.10. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens</b> .....	<b>20</b>
<b>I.10.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif</b> .....	<b>20</b>
<b>I.10.2. Systèmes couplés au réseau alternatif</b> .....	<b>20</b>
<b>I.10.2.1. Machine synchrone</b> .....	<b>20</b>
<b>I.10.2.2. Machine asynchrone à double alimentation</b> .....	<b>21</b>
<b>I.11. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne</b> .....	<b>25</b>
<b>I.11.1. Avantages</b> .....	<b>25</b>
<b>I.11.2. Inconvénients l'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :</b> .....	<b>26</b>
<b>I.12. Conclusion</b> .....	<b>26</b>

## CHAPITRE II: ÉTUDE ET MODELISATION D'UNE MADA

<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>28</b>
<b>II.2 Constitution de la MADA :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.3 Structure de la machine :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.4 Fonctionnement de la MADA :</b> .....	<b>29</b>

II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :.....	29
II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone : .....	29
II.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :.....	29
II.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone : .....	30
II.4.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation: ...	30
II.5. Domaines d'application de la MADA.....	31
II.5.1 l'application de la MADA dans les systèmes éoliens .....	31
II.6 Avantages et inconvénients de la MADA : .....	33
II.6.1 Avantages de la MADA.....	33
II.6.2 Inconvénients de la MADA .....	33
II.7 Modélisation de la MADA : .....	33
II.7.1 Hypothèses simplificatrices :.....	34
II.7.2 Modèle mathématique de la MADA .....	34
II.7.2.1 Equation électrique .....	34
II.7.2.2 Equations magnétiques : .....	35
II.7.2.3 Equation mécaniques .....	36
II.7.3 Modèle biphasé de la MADA .....	36
II.7.3.1 Application de la transformation de Park :.....	36
II.7.3.2 Equations électriques .....	37
II.7.3.3 Équations magnétiques .....	38
II.7.3.4 équations mécaniques.....	38
II.8 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation.....	38
II.8.1 Principe.....	38
II.8.2 Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté : .....	39
II.8.3 Types de commande vectorielle .....	42
II.8.3.1 Commande vectorielle directe : .....	42
II.8.3.2 Commande vectorielle indirecte : .....	43
II.8.3.2.1 Commande indirecte en boucle ouverte : .....	43
II.8.3.2.2 Commande indirecte en boucle fermée (Commande avec boucle de puissance): .....	44
II.8.4 Type du régulateur PI.....	45
II.8.5 Onduleur de tension a deux niveaux : .....	45
II.8.5.1 Modèle de l'onduleur a deux niveaux :.....	45
II.8.5.2Stratégie de commande .....	47
II.8.5.3 Algorithme de commande .....	47
II. 9 Conclusion .....	48

### CHAPITRE III: COMMANDE VECTORIELLE MADA UTILISEES DANS L'ENERGIE EOLIENNE

III.1. Introduction:.....	50
III.2. Principe de La commande vectorielle par l'orientation du flux .....	50
III.3. Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	51
III.4. machines asynchrone à double alimentation : structure avec convertisseur MLI : .....	51
III.5. Stratégie de la commande de la machine asynchrone à double Alimentation :.....	52
III.6. Modèle de la chaîne de conversion:.....	52
III.6.1. Schéma de commande: .....	52
II.6.3. Architecture du dispositif de commande .....	54
III.6.4. Redresseur de tension .....	55
III.6.3.1.Modélisation du redresseur .....	55
III.6.3.2. Commande du redresseur.....	57
III.4. Filtre (côté réseau) .....	57

III.4.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau) .....	57
III.5.Types de commande vectorielle : .....	57
III.5.1. Commande vectorielle directe : .....	58
III.5.1. Commande indirecte : .....	58
III.6. Modélisation de la turbine.....	59
III.6.1. La modélisation.....	59
III.6.1.1. La surface balayée par le rotor.....	59
III.6.1.2. La densité de l'air .....	59
III.6.1.3. La Vitesse du vent .....	59
III.6.1.4 Puissance récupérable par une turbine.....	60
III.6.1.5. Le coefficient de puissance.....	61
III.6.1.6. Modèle du Multiplicateur:.....	62
III.6.1.7. Equation dynamique de l'arbre: .....	62
III.6.2. Schéma bloc du modèle de la turbine.....	63
III.7. Stratégie de commande de la turbine.....	63
III.8. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite.....	65
III.8.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse .....	65
III.9. Système de la chaîne globale .....	66
III.10. Résultats de simulation .....	67
III.11. Interprétations des Résultats.....	68
III.9. Conclusion.....	69

**CHAPITRE IV: COMMANDE SANS CAPTEUR DE VITESSE D'UN MADA**

IV.1.Introduction .....	71
IV.2. Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique .....	71
IV.2.1. Estimation de la vitesse avec modèle de la machine .....	71
IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine.....	73
IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA avec modèle de la machine.....	74
IV.3.1. La méthode du MRAS .....	74
IV.3.2. Application à l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone .....	75
IV.4. Application du MRAS à l'estimation des grandeurs mécaniques de la MADA .....	75
IV.5. Schéma globale de la commande vectoriel de MADA sans capteurs .....	77
IV.6.Résultats de simulation .....	77
IV.7. Interprétation des résultats .....	80
IV.8. Conclusion.....	80
CONCLUSION GENERALE.....	82
Références bibliographiques.....	84

## Liste des figures

<b>CHAPITRE I: CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES ENERGIES EOLIENNE</b>	
FIGURE (I. 1): CONVERSION DE L'ENERGIE CINETIQUE DU VENT. ....	9
FIGURE (I. 2): PRINCIPAUX ORGANES DU CONTROLE DE CONVERSION EOLIEN. ....	9
FIGURE (I. 3): PRINCIPALES COMPOSANTES INTERIEURES DE LA NACELLE D'UNE TURBINE EOLIENNE.....	10
FIGURE (I. 4): EOLIENNE A AXE VERTICAL .....	11
FIGURE (I. 5): EOLIENNE A AXE HORIZONTAL. ....	12
FIGURE (I. 6): TUBE DE COURANT AUTOUR D'UNE EOLIENNE.....	13
FIGURE (I. 7): COEFFICIENT DE PUISSANCE. ....	14
FIGURE (I.8): COEFFICIENT DE PUISSANCE POUR DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES.....	14
FIGURE (I.9): PUISSANCE THEORIQUE DISPONIBLE POUR UN TYPE D'EOLIENNE DONNE.....	15
FIGURE (I. 10): BILAN DES FORCES SUR UNE PALE .....	16
FIGURE (I. 11): FLUX D'AIR SUR UN PROFIL DE PALE "STALL" .....	17
FIGURE (I. 12): VARIATION DE L'ANGLE DE CALAGE D'UNE PALE.....	18
FIGURE (I. 13): AEROGENERATEUR A VITESSE FIXE .....	18
FIGURE (I. 14): AEROGENERATEUR A VITESSE VARIABLE .....	19
FIGURE (I. 15): AEROGENERATEUR A GENERATRICE ASYNCHRONE A CAGE....	20
FIGURE (I. 16): CONTROLE EOLIEN A BASE D'UNE MACHINE SYNCHRONE ET UN CONVERTISSEUR ELECTRONIQUE.....	21
FIGURE (I. 17): CONTROLE DE GLISSEMENT PAR L'ENERGIE DISSIPEE. ....	22
FIGURE (I. 18): STRUCTURE DE KRAMER POUR LA MADA.....	23
FIGURE (I. 19): STRUCTURE AVEC DEUX PONTS A DIODES ET A TRANSISTORS.....	23
FIGURE (I. 20): STRUCTURE DE SCHERBIUS AVEC CYCLO CONVERTISSEUR. ....	23
FIGURE (I. 21): STRUCTURE AVEC CONVERTISSEURS A MLI.....	24
<b>CHAPITRE II: Étude et modélisation d'une MADA</b>	
FIGURE (II. 1): SCHEMA GENERAL D'UN SYSTEME UTILISANT UNE MADA ALIMENTE PAR UN SEUL CONVERTISSEUR STATIQUE.....	28
FIGURE (II. 2): STRUCTURE DE LA MACHINE.....	29
FIGURE (II. 3): MODES OPERATIONNELS CARACTERISTIQUES DE LA MADA. ....	30
FIGURE (II. 4): EOLIENNE INSTALLEE EN MER .....	32
FIGURE (II. 5): SCHEMA DE PRINCIPE D'UN AEROGENERATEUR A NASE DE LA MADA.....	32
FIGURE (II. 6): REPRESENTATION SIMPLIFIE DE LA MADA.....	34
FIGURE (II. 7): MODELE DE PARK DE LA MADA. ....	36
FIGURE (II. 8): REPRESENTATION DE LA MACHINE DANS LE REPERE DIPHASE.....	37
FIGURE (II. 9): ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE SUR L'AXE D.....	39
FIGURE (II. 10): SCHEMA BLOC DE LA MADA AVEC ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE. ....	42
FIGURE (II. 11): MODELE DE LA MADA POUR LE CONTROLE DES PUISSANCES. ....	43
FIGURE (II. 12): SCHEMA DE LA COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERTE. ....	44
.....	44
FIGURE (II. 13): SCHEMA DE LA COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE FERMEE. ....	45
FIGURE (II. 14): MODELE EQUIVALENT DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX. ....	46
FIGURE (II. 15): PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TECHNIQUE MLI TRIANGULE SINUSOÏDALE A UNE PORTEUSE.....	48

**CHAPITRE III: Commande vectorielle MADA utilisées dans l'énergie éolienne**

FIGURE (III. 1): PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE.....	50
FIGURE (III. 2): PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE.....	51
FIGURE (III. 3): STRUCTURE DU STATOR ET DES CONTACTS ROTORIQUES DE LA MADA.....	51
FIGURE (III. 4): SCHEMA DE PRINCIPE DE LA COMMANDE EN PUISSANCE DE LA MADA.....	53
FIGURE (III. 5): MODELE DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE.....	54
FIGURE (III. 6): STRUCTURE CLASSIQUE D'UNE PLL TRIPHASEE.....	56
FIGURE (III. 7): STRUCTURE DU REDRESSEUR AVEC REGULATEUR DE LA TENSION REDRESSEE.....	57
FIGURE (III. 8): MODELE DE LA MADA POUR LE CONTROLE DES PUISSANCES..	58
FIGURE (III. 9): SCHEMA D'UNE TURBINE EOLIENNE.....	60
FIGURE (III. 10): EVOLUTION DU COEFFICIENT DE PUISSANCE DE L'EOLIENNE (ANGLE DE CALAGE FIXE).....	62
FIGURE (III. 11): SCHEMA BLOC DU MODELE DE LA TURBINE.....	63
FIGURE (III. 12): CARACTERISTIQUE PUISSANCE - VITESSE D'UNE EOLIENNE ..	64
FIGURE (III. 13): SCHEMA BLOC DE LA MAXIMISATION DE LA PUISSANCE EXTRAITE SANS ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE.....	66
FIGURE (III. 14): LA STRUCTURE GLOBALE DU LA CHAINE ETUDIE EST CONSTITUEE D'UNE MADA ENTRAINEE PAR UNE TURBINE EOLIENNE.....	66
FIGURE (III. 15): VITESSE DU VENT.....	67
FIGURE (III. 16): VITESSE DE ROTATION.....	67
FIGURE (III. 17): COURANT ROTORIQUE D'UNE PHASE.....	68
FIGURE (III. 18): COURANT STATORIQUE D'UNE PHASE.....	68
FIGURE (III. 19): COEFFICIENT DE PUISSANCE DE LA TURBINE.....	68
FIGURE (III. 20): VITESSE RELATIVE DE EOLIENNE.....	68

**CHAPITRE IV: Commande sans capteur de vitesse d'un MADA**

FIGURE (IV. 1): SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ESTIMATEUR DE MRAS.....	74
FIGURE (IV. 2): SCHEMA DE PRINCIPE D'UN OBSERVATEUR MRAS BASE SUR LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.....	76
FIGURE (IV. 3): COMMANDE SANS CAPTEUR DE VITESSE MECANIQUE DE LA GADA BASEE SUR UN OBSERVATEUR MRAS BASE SUR LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.....	77
FIGURE (IV. 4): VITESSE DE VENT EN FONCTION DU TEMPS.....	77
FIGURE (IV. 5): LA VITESSE ROTORIQUE ESTIMEE PAR D'OBSERVATEUR MODE GLISSENT ADAPTATIVE AVEC ZOOM.....	78
FIGURE (IV. 6): ERREUR DE LA VITESSE ESTIMEE..... خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.	78
FIGURE (IV. 7): COURANT D'UNE PHASE ROTORIQUE.....	78
FIGURE (IV. 8): COURANT D'UNE PHASE STATORIQUE.....	78
FIGURE (IV. 9): PUISSANCE ACTIVE STATORIQUE.....	78
FIGURE (IV. 10): PUISSANCE REACTIVE STATORIQUE ET SA REFERENCENT SA REFERENCE.....	78
FIGURE (IV. 11): COEFFICIENT DE PUISSANCE DE LA TURBINE.....	79
FIGURE (IV. 12): VITESSE RELATIVE DE L'EOLIE.....	79
FIGURE (IV. 13): MPPT DE L'EOLIENNE.....	79

# NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification	Unité
$C_p$	Coefficient de puissance	
$C_e$	couple électromagnétique	$N.m$
$C_r$	couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
$J$	moment d'inertie des parties tournantes	$K.g.m^2$
$f$	coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m.s/rad$
$G$	Rapport de vitesse du multiplicateur	
$g$	Glissement	
$K_p, K_i$	Gains du régulateur PI classique	
$M_{sr}$	inductances mutuelles entre le stator et le rotor	$H$
$M_s$	inductances mutuelles entre les phases statoriques	$H$
$M_r$	inductances mutuelles entre les phases rotoriques	$H$
$P_{mec}$	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	$W$
$P_r$	Puissance active rotorique	$W$
$P_s$	Puissance active statorique	$W$
$P_v$	Puissance portée par le vent	$W$
$P_{rés}$	Puissance de réseau	$W$
$Q_s$	Puissance réactive statorique	$VAR$
$R$	Rayon de la turbine	$m$
$R_s$	résistances statorique	$\Omega$
$R_r$	résistances rotorique	$\Omega$
$L_s$	inductances propres statorique	$H$
$L_r$	inductances propres rotorique	$H$
$S$	Surface balayée par le rotor de la turbine	$m$
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	$W$
$i_{abcr}$	Courants instantanés des phases rotoriques	$A$
$v_{abcr}$	Tensions instantané des phases rotoriques	$V$
$i_{abcs}$	Courants instantanés des phases statoriques	$A$

$v_{abcs}$	Tensions instantané des phases statoriques	V
$i_{dqr}$	Composantes du courant rotorique dans le repère $(d, q)$	A
$v_{dqr}$	Composantes de tension rotorique dans le repère $(d, q)$	V
$i_{dqs}$	Composantes du courant statorique dans le repère $(d, q)$	A
$v_{dqs}$	Composantes de tension statorique dans le repère $(d, q)$	V
$p$	Nombre de paires de pôles	
$s$	Opérateur de Laplace	
$v_{abcr}$	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
$v_{abcs}$	Tensions instantanées des phases statoriques	V
$v_{dqr}$	Composantes de tension rotorique dans le repère $(d, q)$	V
$v_{dqs}$	Composantes de tension statorique dans le repère $(d, q)$	V
$\beta$	Angle de calage des pales	°
$\Omega$	vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
$\Omega_{ref}$	vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
$\theta$	Angle entre l'axe rotorique $A$ et l'axe statorique .	rd
$\theta_s$	Position de stator	rd
$\theta_r$	Position électrique de rotor	rd
$\lambda$	Vitesse spécifique	
$\lambda_{cpmax}$	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne	
$\omega$	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
$\omega_{coor}$	Vitesse angulaire du repère biphasé	rd/sec
$\omega_s$	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
$\Phi_{abcr}$	Flux instantanés des phases rotoriques	Wb
$\Phi_{abcs}$	Flux instantanés des phases statoriques	Wb
$\Phi_{dqr}$	Composantes du flux rotorique dans le repère $(d, q)$	Wb
$\Phi_{dqs}$	Composantes du flux statorique dans le repère $(d, q)$	Wb
$PI$	Proportionnelle intégrale	
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe	
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation	
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation	
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions	

MPPT	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale
$\Omega_{cut-out}$	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est arrêtée
	Puissance mécanique fournie par l'arbre
$\Omega_{cut-in}$	Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne est démarrée
$S_{a,b,c}$	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
$K_i$	Paramètre intégrateur
$K_p$	Paramètre proportionnel
$i_{ch}$	courant de la charge non-linéaire
$i_{dc}$	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu
$\bar{e}$	Vecteur de la tension de ligne
$\tilde{e}$	Tension instantanée de phase du réseau estimée
VOC	Contrôle à tension orientée
$h_d$ et $h_d$	la largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive.



# **Introduction Générale**

### Introduction Générale

L'énergie, et en particulier l'énergie électrique, est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité est une condition préalable au développement socio-économique d'un pays. La révolution industrielle ces dernières décennies a conduit à d'énormes besoins planétaires en énergie électrique. Certes, cet accès est loin d'être assuré dans les pays émergents et les moins avancés et afin de limiter l'utilisation des centrales nucléaires et de l'énergie fossile, plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. Réduire les émissions de gaz à effet de serre et exploiter Les ressources d'énergie renouvelable constituent aujourd'hui un véritable défi mondial. Parmi ces énergies renouvelables, l'éolienne, qui représente une énergie complémentaire à l'énergie nucléaire et aux énergies fossiles. C'est une forme d'énergie inépuisable et propre extraite indirectement de l'énergie solaire, car c'est la différence température et pression induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire.

Le vent est un type d'énergie solaire libre, propre et inépuisable. Les vents proviennent du réchauffement inégal de l'atmosphère par le soleil, des irrégularités de la surface de la terre et de la rotation de la terre. Les régimes d'écoulement du vent sont modifiés à travers le terrain, les conditions environnementales et les bâtiments. Ce flux de vent, ou énergie de mouvement, lorsqu'il est récolté par les éoliennes modernes, permettent de produire de l'électricité. Les termes énergie éolienne ou production d'énergie éolienne décrivent la tâche où le vent est utilisé pour produire de l'énergie mécanique ou de l'électricité. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique à l'intérieur des éoliennes en énergie mécanique. Cette puissance mécanique peut être utilisée pour broyer le grain ou pomper l'eau ou peut-être un générateur peut convertir cette puissance mécanique en énergie électrique.

le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse a les éoliennes à vitesse variable ont une grande efficacité dans une large gamme de vitesses de vent. Ce type du système de conversion de l'énergie éolienne peut utiliser différents types de générateurs électriques et de contrôle En fonctionnement à vitesse variable, lorsque les éoliennes sont connectées à un réseau électrique, il est nécessaire d'inclure quelques étapes de conversion de fréquence. En pratique, il y a deux topologies de puissance : un convertisseur de puissance connecté entre le stator

enroulement du générateur et un convertisseur de puissance relié entre le rotor enroulé de la génératrice et le réseau électrique.

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres.

Dans **le premier chapitre** de ce travail nous commençons par l'historique de l'exploitation de l'énergie éolienne et aussi on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

**Le deuxième chapitre** concerne le principe de l'étude et la simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à doublement alimentée (MADA) qui sont la plus répandues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne.

Elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, de plus le contrôle des tensions rotoriques nous permet de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

Dans **Le troisième chapitre** Le troisième chapitre traite de de la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA aussi on en utilisant la technique MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent.

**Le quatrième et dernier chapitre** sera dédié à la commande sans capteurs mécaniques par observateur MRAS-Ce de la chaîne de conversion éolienne qui basée sur la machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable.

Finalement ce travail sera clôturé par une conclusion générale.



**Chapitre I:**  
**Généralité sur les**  
**énergies éoliennes**

## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne.

Energie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

Ce chapitre fera une présentation générale des différents types d'éoliennes, leur fonctionnement et conception ainsi que leurs avantages et inconvénients. La dernière partie de ce chapitre est consacré aux différentes machines électriques et plus spécifiquement la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).

## I.2.Énergie renouvelable:

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle. L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique. La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1

% pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 %.

### **I.3.Histoire**

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Au Paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu ; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants). Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant l'IVe millénaire av. J.-C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine, ont par la suite connu un développement mondial. L'invention du voilier a été un progrès important pour le développement des échanges commerciaux dans le monde. Celle des moulins à eau et à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. Fernand Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du xie siècle au xiiie siècle, des moulins à eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5 hon 1 pour une roue à eau, parfois cinq, au plus dix pour les ailes d'un moulin à vent. Mais, dans une économie mal fournie en énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières, ... ». À la fin du xviiiè siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à plus de 50 % la part de la traction animale, environ 25 % celle du bois, 10 à 15 % celle des moulins à eau, 5 % celle de la force humaine et un peu plus de 1 % celle du vent pour la marine marchande ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées ». On peut donc, évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %. Il mentionne pour mémoire la batellerie fluviale, la marine de guerre, le charbon de bois et de terre. L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au xixe siècle ;

les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. L'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du xixe siècle. Au xixe siècle, François de Larderello met au point, en Italie, les techniques d'utilisation de la géothermie. Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. En 1911, la première centrale géothermique est construite à Larderello. Au milieu du xxe siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque se développent au début des années 2000. Sous l'effet des progrès technologiques et des économies d'échelle liées aux volumes croissants installés, les filières de production d'énergie renouvelable, encore émergentes au début des années 2000, voient leurs coûts évoluer rapidement. Depuis la fin du xxe siècle, en réponse à un début de raréfaction du pétrole, aux impacts climatiques et sanitaires négatifs des énergies carbonées, ainsi qu'aux accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima et aux controverses sur le traitement des déchets du nucléaire, une réorientation mondiale vers les énergies renouvelables est constatée.[5]

#### **I.4.Aperçu général**

En 2017, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée à 18,1 %, dont 7,5 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 10,6 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,2 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants. Dans le secteur de l'électricité, la part globale en 2018 était de 26,2 %, l'hydroélectricité ayant la plus grande part avec 15,8 %. La part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire, dans laquelle les énergies renouvelables ont tendance à être sous-représentées en raison de la méthode de calcul appliquée (voir bilan énergétique), était de 13,7 % en 2016. Afin de rattraper le retard pris par rapport aux objectifs de Rio de Janeiro et Kyoto, l'ONU a proposé en 2011 comme objectif de produire 30 % de l'énergie utilisée en 2030 grâce à des énergies renouvelables, contre 13 % en 2010. Les énergies renouvelables sont de différents types, décrits ci-dessous. Les énergies renouvelables ont plus tendance à venir s'ajouter aux énergies classiques qu'à les remplacer, en particulier dans le domaine de l'électricité.[6]

### **I.4.1. Énergie solaire**

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde. Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment : l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend du Soleil ; l'énergie éolienne, provenant de l'énergie cinétique du vent lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau, générés par le Soleil, la rotation de la Terre et la force de Coriolis ; l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues, liées aux mouvements des océans et des cours d'eau ; le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil. On peut ajouter les combustibles fossiles, provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...) auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante.

### **I.4.2. Énergie géothermique**

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre issue de l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium<sup>23</sup>. Pour autant, la géothermie comporte aussi des risques au niveau humain. Les techniques évoluent et permettent de chercher la chaleur à de plus grandes profondeurs. La modification des pressions dans les sous-sols a un impact sur l'activité sismique. La fréquence des tremblements de terre mais aussi leur puissance peut être augmentée à cause de l'exploitation de cette énergie<sup>24</sup>. Contrairement à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

### **I.4.3. Biomasse**

L'énergie tirée de la biomasse provient, indirectement, de l'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées

n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. Le bilan environnemental est un souci majeur lié à l'utilisation de l'énergie récupérée. Jusqu'au xviii<sup>e</sup> siècle, la biomasse était la principale ressource énergétique utilisée par l'humanité, en particulier sous forme de bois ; c'est encore aujourd'hui, et de loin, la principale énergie renouvelable. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production, du fait de la faible efficacité énergétique de la photosynthèse : 3 à 6 %<sup>21</sup> contre, par exemple, 14 à 16 % pour une cellule photovoltaïque en silicium monocristallin<sup>22</sup> ; en outre, sa production sous forme de biocarburants entre en conflit avec la production vivrière. Les biocarburants ont un impact environnemental et social contesté (concurrence avec la production alimentaire, dépenses énergétiques très importantes pour le transport et la transformation des matières premières).

#### **I.4.4. Énergie hydraulique**

Les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc à l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) acquiert, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; lorsque l'eau tombe, une partie de cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé, etc.).

#### **I.4.5. Énergie éolienne**

L'énergie éolienne consiste à utiliser l'énergie mécanique des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. L'énergie éolienne a été exploitée dès l'Antiquité, à l'aide de voiliers comme en témoigne la « barque solaire » de Khéops. L'énergie éolienne a aussi été exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile, comme ceux que l'on peut voir aux Pays-Bas, ou encore, ceux mentionnés dans Don Quichotte. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains. Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

## I.5. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

### I.5.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Figure (I.1).



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

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Ceci est montré sur la figure (I.2). [7]

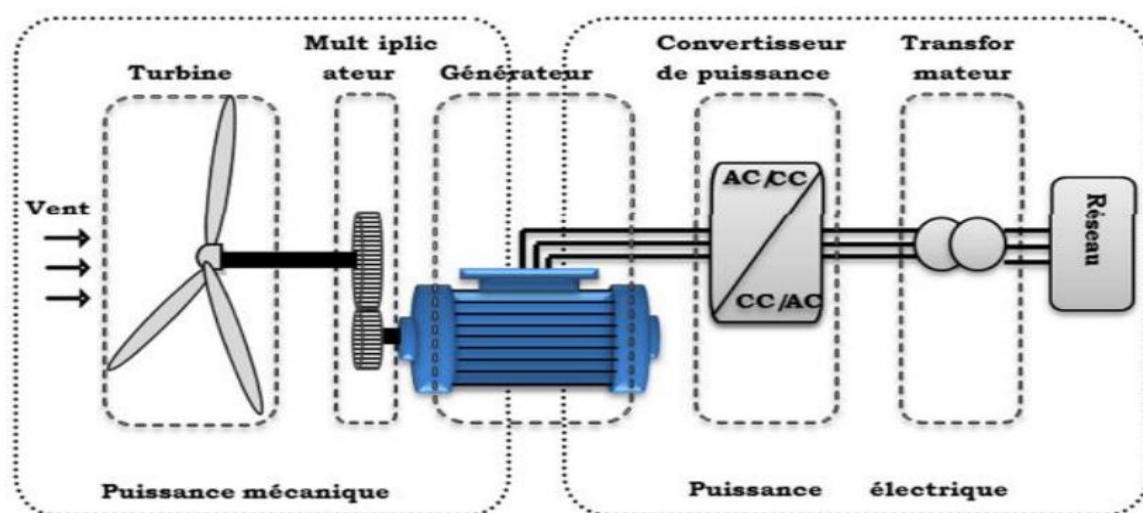


Figure (I. 2): Principaux organes du système de conversion éolien.

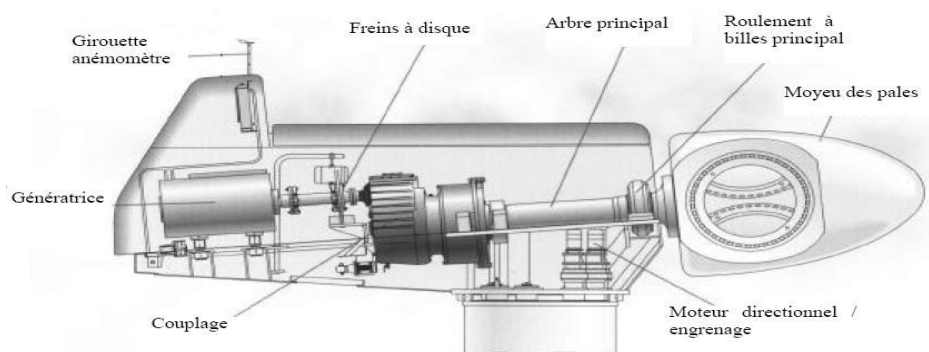
L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez

complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [8]

### I.5.2. Principaux composants d'une éolienne

différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur)[22].
- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I-3) : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [22]



**Figure (I. 3):** Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [22]

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [22]

## I.6. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe vertical
- Les turbines éoliennes à axe horizontal

### I.6.1. Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal .[10]



**Figure (I. 4):** Eolienne à axe vertical

### I.6.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal plus largement employées nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important. [8]



**Figure (I. 5):** Eolienne à axe horizontal.

## I.7. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

### I.7.1. Loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I-5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le

rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

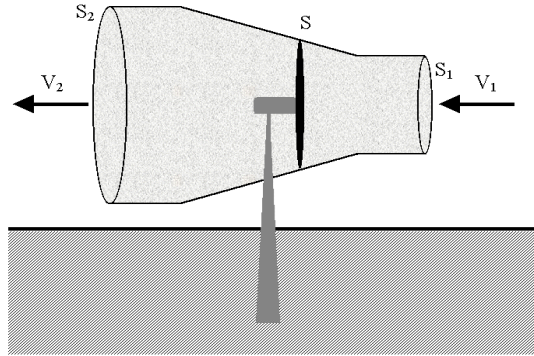
$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

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

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (I.1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$



**Figure (I. 6):** Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{V_1}{V_2})) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{4} \quad (\text{I.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 1.6), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_P$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. [10]

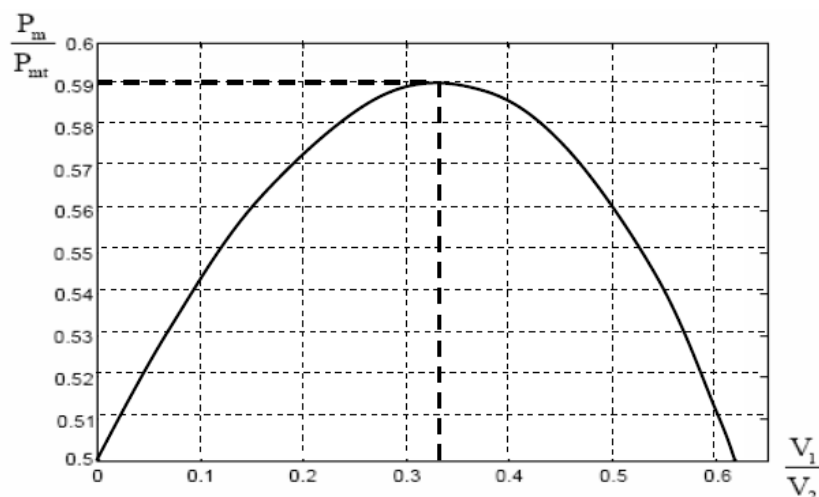


Figure (I. 7): Coefficient de puissance.

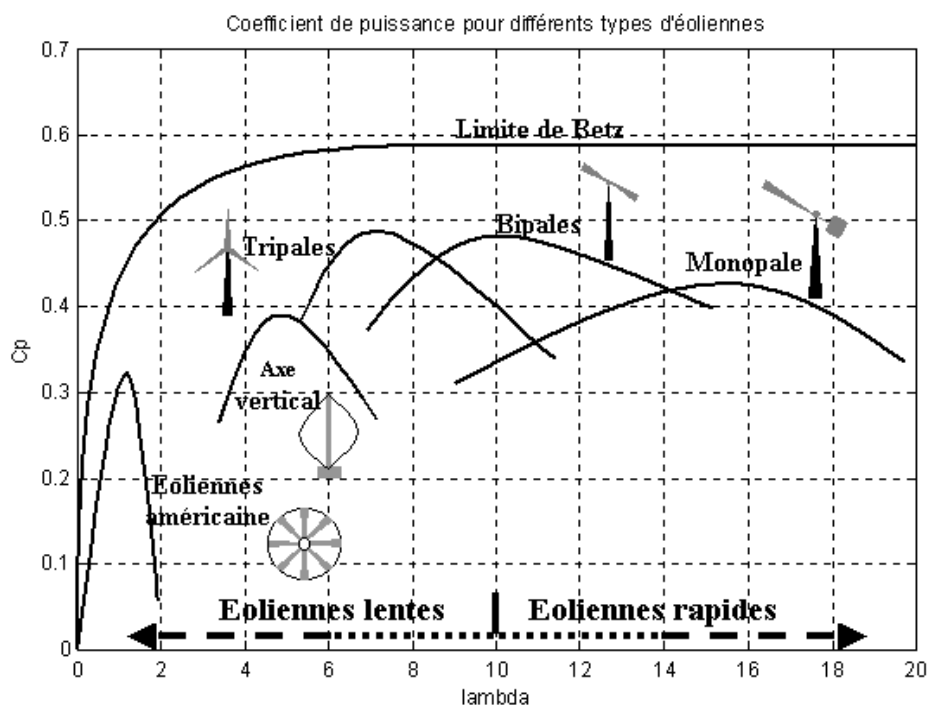


Figure (I. 8): Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1.8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont au coup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tri pales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1-6) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [13].

### I.7.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I.7)$$

$\Omega_1$ : vitesse de rotation avant multiplicateur et  $R$  : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $K$ , la puissance mécanique  $P_{mg}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_1 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.8)$$

Avec

$\Omega_2$ : vitesse de rotation avant multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure I-8). [13]

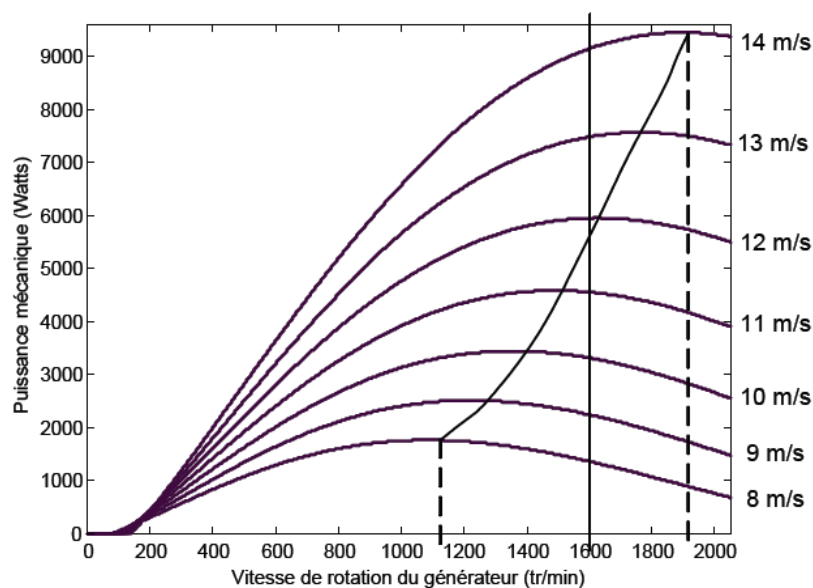


Figure (I. 9): Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure (I-9) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

## I.8. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

### I.8.1. Bilan des forces sur une pale

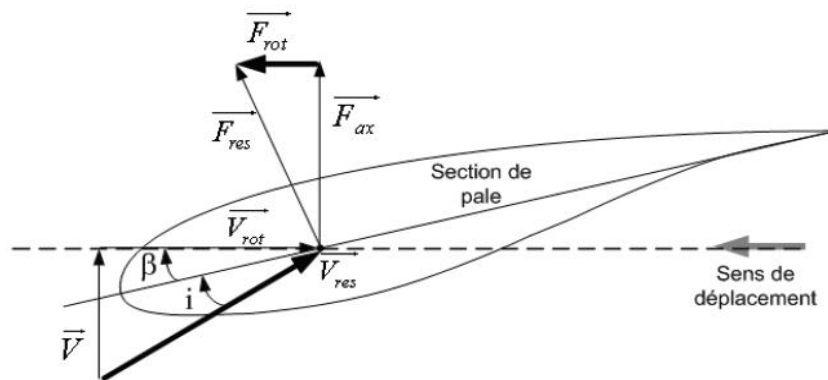
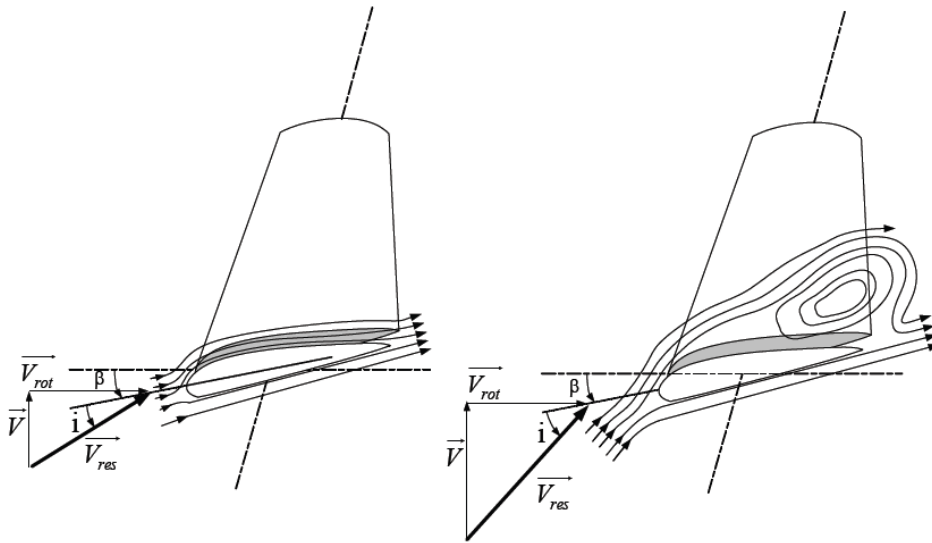


Figure (I. 10): Bilan des forces sur une pale

La Figure (I.10) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [11]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

## I.8.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

### I.8.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"

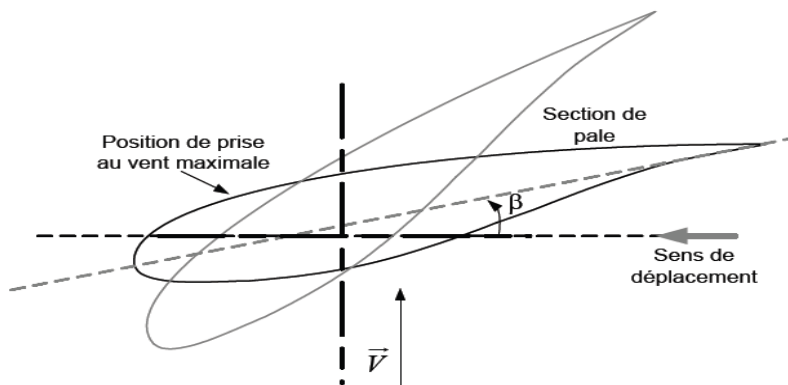


**Figure (I. 11):** Flux d'air sur un profil de pale "stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I-11) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle d'incidence  $i$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante. [15]

### I.8.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"



**Figure (I. 12):** Variation de l'angle de calage d'une pale

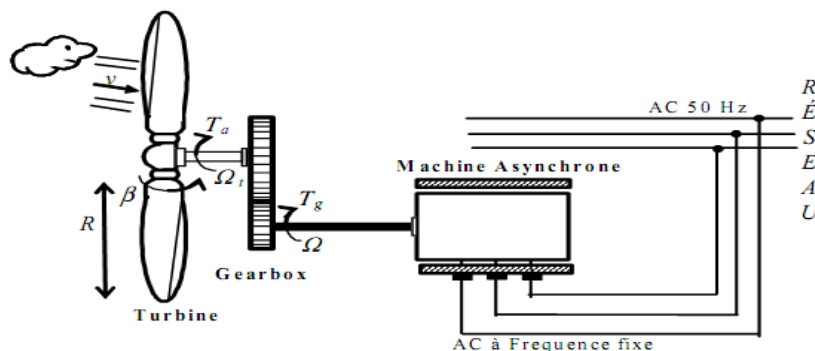
Ce système de régulation utilise l'angle des pales face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

## I.9. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

### I.9.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I-8), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.



**Figure (I. 13):** Aérogénérateur à vitesse fixe

### Avantage du fonctionnement à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

### Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques).
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

### I.9.2. Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I-9). [22]

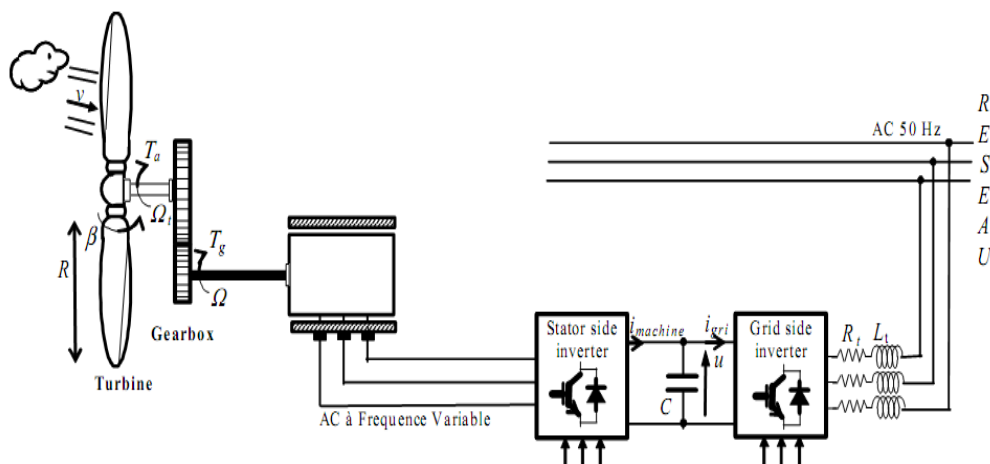


Figure (I. 14): Aérogénérateur à vitesse variable

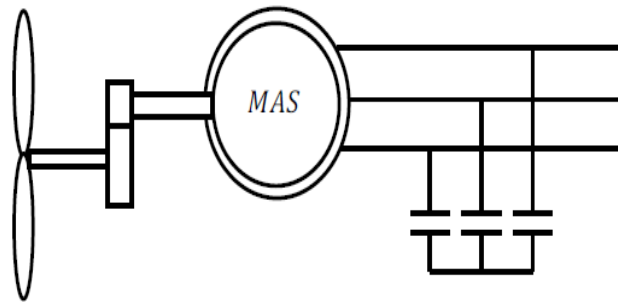
## I.10. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir:

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- L'implantation sur terre ferme (On shore) ou en mer (Offshore).
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

### I.10.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs.



**Figure (I. 15):** Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

### I.10.2. Systèmes couplés au réseau alternatif

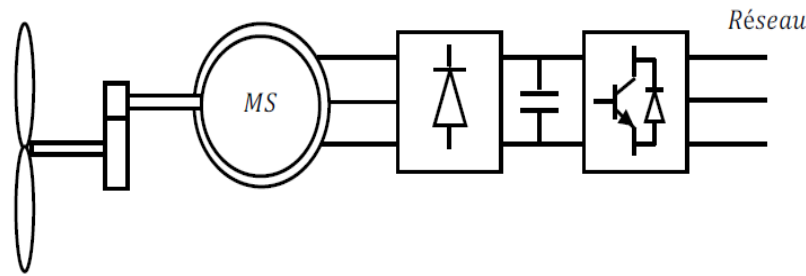
Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. [19]

#### I.10.2.1. Machine synchrone

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au

réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. [11].



**Figure (I. 16):** Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéro-turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

### I .10.2.2. Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

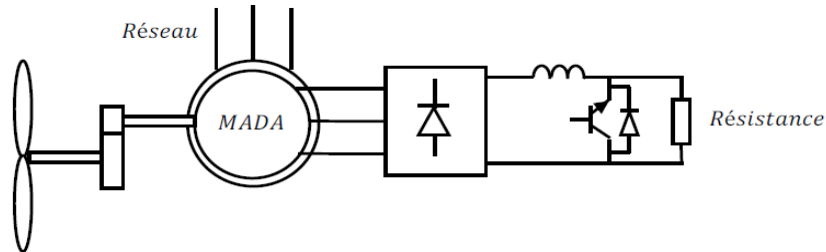
Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rétorque transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation avec leurs dispositifs de réglage de la vitesse à travers le contrôle de glissement sont envisageables:

A- Contrôle de glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé. Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.



**Figure (I. 17):** Contrôle de glissement par l'énergie dissipée.

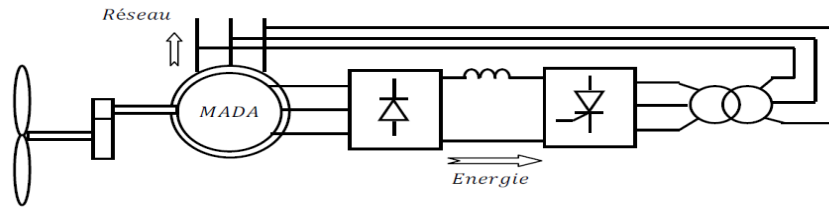
Vue la taille de la résistance (située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse avec un glissement maximum qui ne dépasse pas 10 %. L'inconvénient de ce principe c'est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion [26].

#### B- Transfert de la puissance rotorique sur le réseau

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. On peut utiliser pour cette récupération un système statique de conversion d'énergie constitué par un convertisseur de puissance. Ce convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25 % de la puissance nominale) pour un glissement maximal correspondant à la puissance statorique nominale. Pratiquement, plusieurs solutions sont envisageables :

- Structure à base de pont à diodes et pont à thyristors :

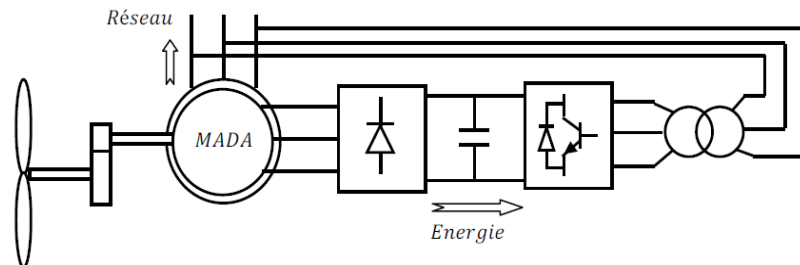
Cette structure est appelée montage de Kramer. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (figure I-17). [20]. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.



**Figure (I. 18):** Structure de Kramer pour la MADA.

- Structure à base de pont à diodes et pont à transistors :

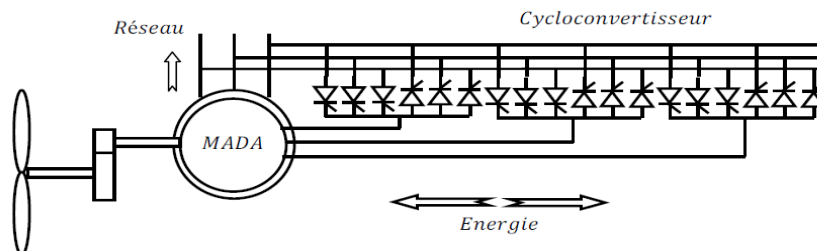
La structure consiste à remplacer l'onduleur à commutation naturelle constitué de thyristors, par un onduleur à commutation forcée et à modulation de largeur d'impulsions (MLI), constitué par des transistors de puissance (figure I-19). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont à diodes. Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations de tensions importantes qui peuvent réduire leur durée de vie [50].



**Figure (I. 19):** Structure avec deux ponts à diodes et à transistors.

- Structure à base de cyclo convertisseur :

Cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans deux sens. Cette topologie présente donc plus de marge de manœuvre pour la commande. [27]

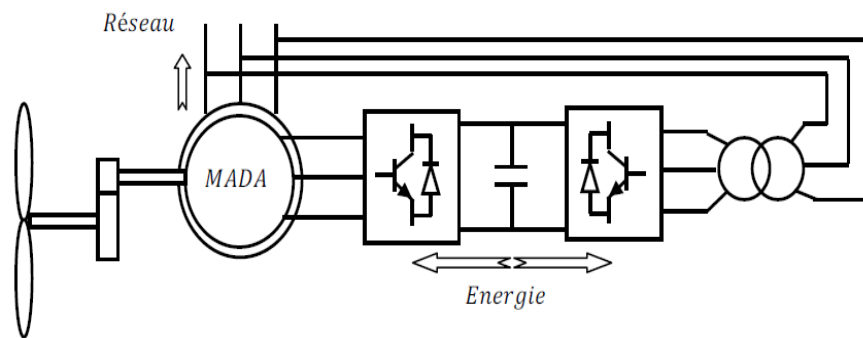


**Figure (I. 20):** Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.

Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de Scherbius". Formellement, le principe de Scherbius est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, le principe de Scherbius est reproduit à l'aide d'un cyclo convertisseur. Celui utilisé dans la figure ci-dessus est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau. Comme la puissance est bidirectionnelle, il est possible de faire varier l'énergie de glissement et faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur.

- Structure à base de convertisseur à MLI :

Une autre structure intéressante (figure I-21) utilise deux ponts triphasés à IGBT commandés par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau.



**Figure (I. 21): Structure avec convertisseurs à MLI.**

Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement du convertisseur à MLI du côté du réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

C'est pour ça que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable.
- Le convertisseur de puissance de petite dimension.
- Le niveau bas de fluctuations mécaniques.
- La possibilité de fonctionnement en hypo-synchronisme et en hyper-synchronisme, ce qui permet pour ce dernier mode de fonctionnement de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau.

- Et enfin le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

### **I.11. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

#### **I.11.1. Avantages**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>, ni d'autres gazes. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 milles tonnent de SO<sub>2</sub> et 17.5 milles tonnent de Noix. Ces émissions sont les responsables des pluies acides. [23]
- Elle ne nécessite aucun carburant.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risqué comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

**I.11.2. Inconvénients l'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :**

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées.
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

**I.12. Conclusion**

La première partie du chapitre est dédiée à la présentation de l'éolienne, son fonctionnement et les différentes parties qui la compose. Dans la deuxième partie on a cité les deux grande familles de la machine utilisée dans les systèmes de conversion électromécanique (machines asynchrones, machines synchrone).et pour finir la dernière partie du chapitre et consacrait a la description de la machine asynchrone à double alimentation et son mode de fonctionnement, les éléments qui la compose ainsi que les différent type de cette dernière.



**Chapitre II:  
Étude et  
modélisation d'une  
MADA**

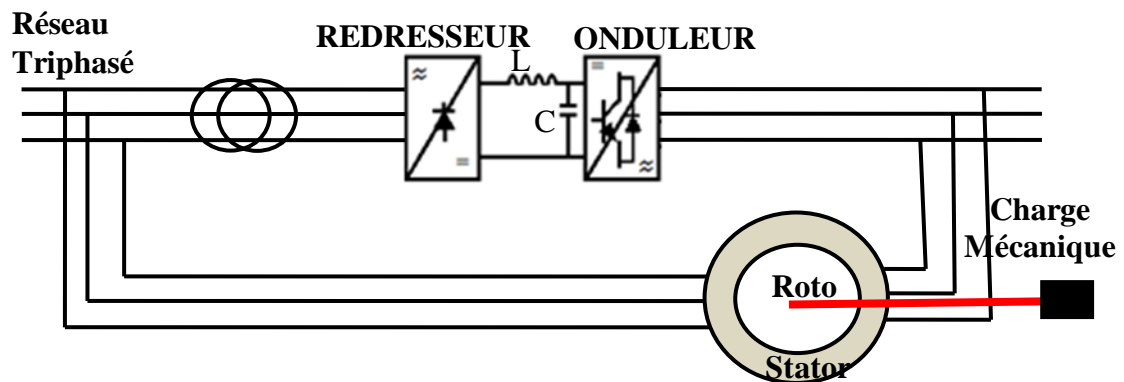
## II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la machine asynchrone à double alimentation, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportées par cette machine, ainsi que les différents domaines d'application.

En plus, on va présenter la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, cette modélisation était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, ainsi que la commande vectorielle.

## II.2 Constitution de la MADA :

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure II.1). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution. [24]

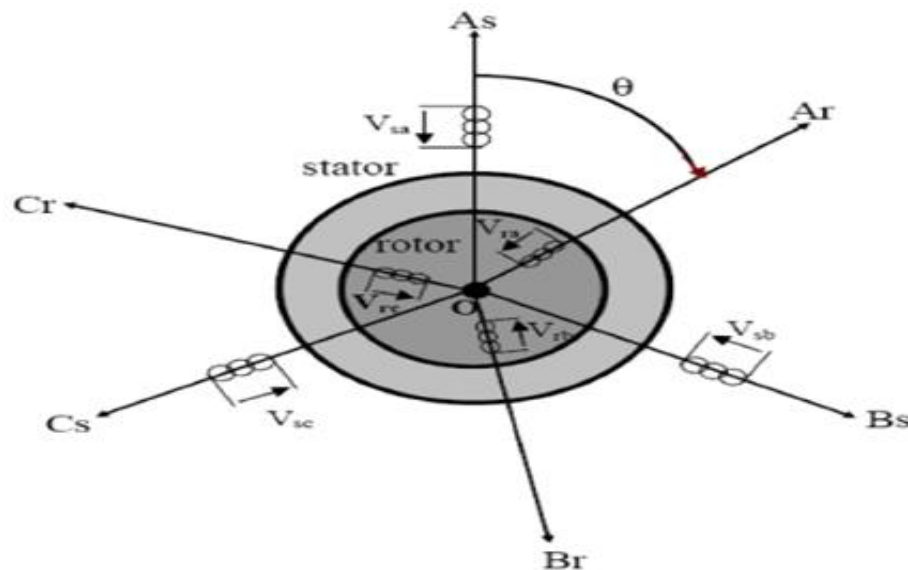


**Figure (II. 1):** Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique

## II.3 Structure de la machine :

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la ( figure II.2) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courant de rotor.[15]



**Figure (II. 2):** Structure de la machine.

#### **II.4 Fonctionnement de la MADA :**

Le principe du contrôle du MADA peut être compris dans quatre modes de fonctionnement.  $P_s$ ,  $P_r$  et  $P_m$  désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique. D'une autre façon la puissance délivrée au réseau (ou fournie par le réseau).

##### **II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :**

Montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme de mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor. [15]

##### **II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :**

Montre que la puissance est fournie par le réseau au rotor et stator. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement. [15]

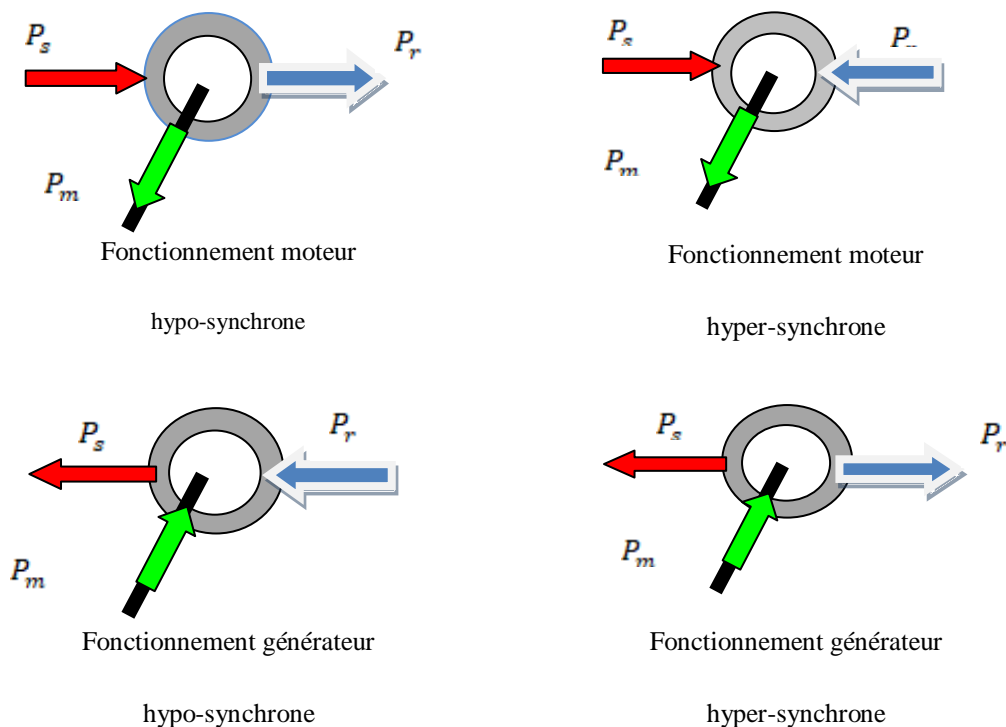
##### **II.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :**

Montre que la puissance fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a

donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement. [15]

#### II.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :

Lorsque la vitesse augmente, le générateur fonctionne en hyper synchronisme. La figure montre que la puissance est fournie au réseau par le stator est 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 asynchrone 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. [15]



**Figure (II. 3):** Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.

#### II.4.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi f$ . et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gr}$  telle que [26] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_g \quad (\text{II.1})$$

Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés. [26]

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_{ro}$ , définie à partir de  $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$  c'est-à-dire:  $f_{ro} = fg$  (II.2)

## II.5. Domaines d'application de la MADA

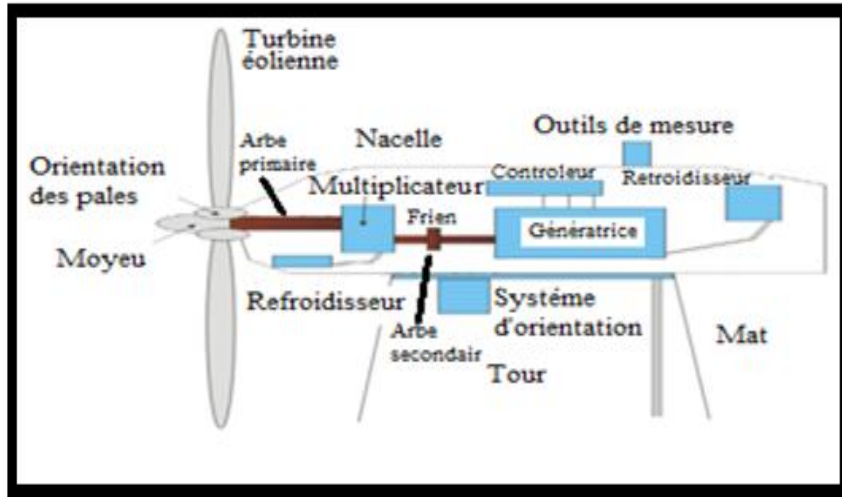
La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application.

L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée. [47]

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

### II.5.1 l'application de la MADA dans les systèmes éoliens

Actuellement, la majorité des éoliennes installées de puissance supérieure à 1MW utilisant une machine asynchrone pilotée par le rotor.



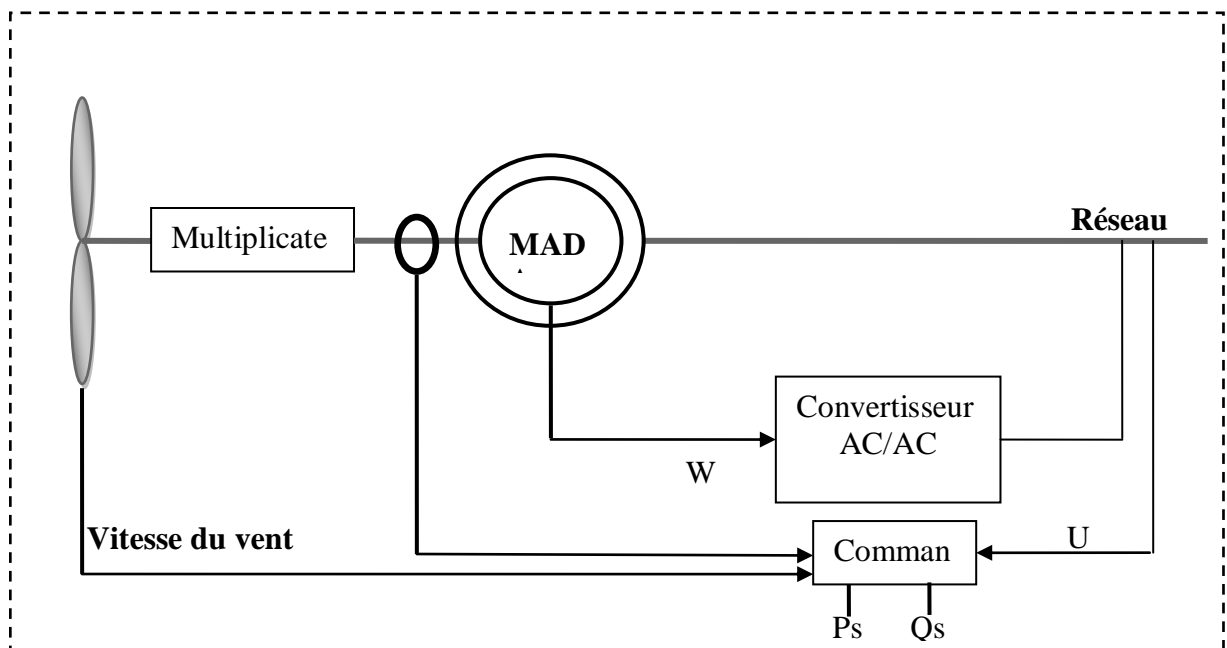
**Figure (II. 4):** Eolienne installée en mer

Les turbines de vent construites pour des puissances allant jusqu'à 4.5 MW.

On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer, vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante.

Une synthèse bibliographique a mis en l'abondant littérature sur ce sujet a permis d'identifier un système d'alimentation particulière adéquat reposant sur l'utilisation d'un convertisseur AC/AC (cyclo-convertisseur) ou bien AC/DC/AC (redresseur-onduleur)

Les convertisseurs sont dimensionnés pour faire la puissance rotorique qui représente environ de 20 à 30% de la puissance nominale. C'est l'intérêt de cette technique.



**Figure (II. 5):** Schéma de principe d'un aérogénérateur à nase de la MADA.

## **II.6 Avantages et inconvénients de la MADA :**

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

### **II.6.1 Avantages de la MADA**

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer:

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présenté la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.

### **II.6.2 Inconvénients de la MADA**

- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance. [21]
- Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais. [11]

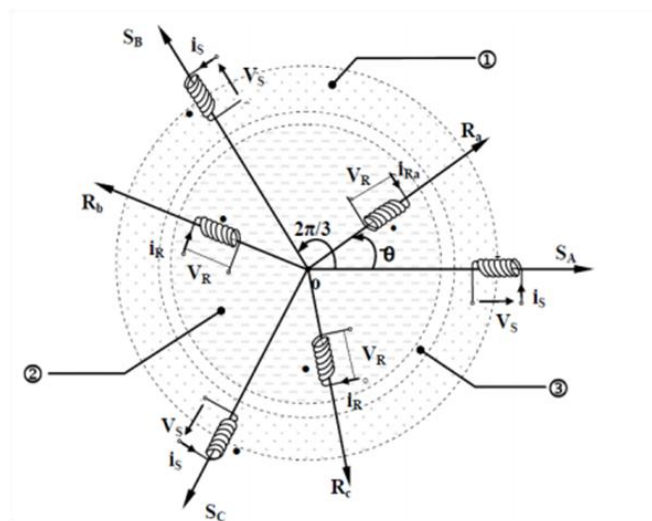
## **II.7 Modélisation de la MADA :**

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématiques qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

### II.7.1 Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements. [11][19]
- Comportement de la machine asynchrone à double alimentation:
  - trois bobines statorique ( $S_a, S_b, S_c$ ) décalées entre elles par un angle de  $(2\pi/3)$ .
  - trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, ( $R_a, R_b, R_c$ ).

La figure (II.6) montre la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).



1- Partie fixe : Stator. 2-Partie mobile : Rotor. 3-Entrefer.

**Figure (II. 6):** Représentation simplifié de la MADA.

## II.7.2 Modèle mathématique de la MADA

### II.7.2.1 Equation électrique

En appliquant la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine, et en tenant compte des hypothèses simplificatrices on peut écrire :

Pour l'enroulement statoriques :

$$[V_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.3})$$

Pour l'enroulement rotoriques :

$$[V_r] = R_r [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.4})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$[\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

### II.7.2.2 Equations magnétiques :

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Tel qui : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

En remplaçant les relations (II.7) respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II.10})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}]\frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d}{dt}([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II.11})$$

### II.7.2.3 Equation mécaniques

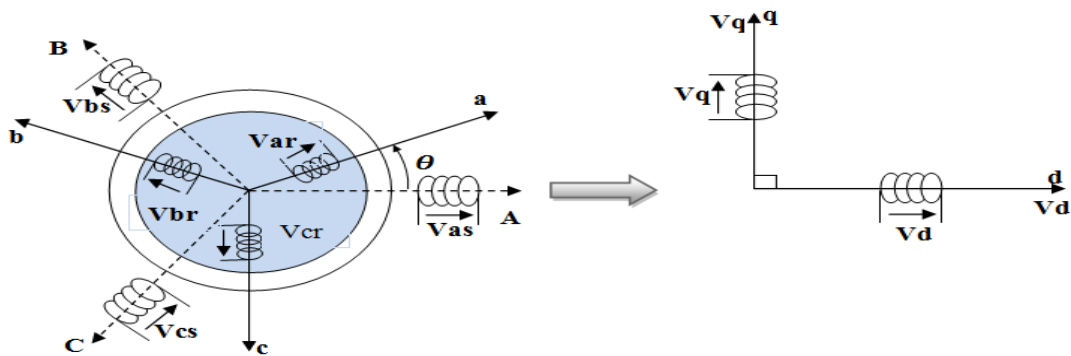
L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \cdot \Omega \quad (\text{II.12})$$

## II.7.3 Modèle biphasé de la MADA

### II.7.3.1 Application de la transformation de Park :

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice, en projetant les grandeurs selon les axes fixes du stator, sur des axes tournant du rotor.



**Figure (II. 7):** Modèle de PARK de la MADA.

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

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

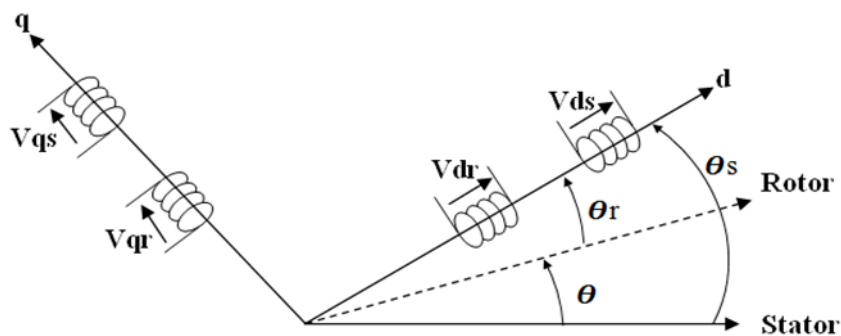
La matrice de transformation inverse est donnée par l'expression suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Il est noté par  $\theta_s$  l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (( $\theta_r$ ). Rotoriques) (figure (II.7)).

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

$$\theta_r = \theta_s - \theta$$



**Figure (II. 8):** Représentation de la machine dans le repère diphasé.

### II.7.3.2 Equations électriques

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor, Les expression des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

### II.7.3.3 Équations magnétiques

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

### II.7.3.4 équations mécaniques

Après qu'ont effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimée sous différentes formes, on trouve celle-ci:

$$C_e = p(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.17})$$

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.18})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.19})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.20})$$

## II.8 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une très bonne solution pour des applications hautes performances comme les systèmes de génération de l'énergie électrique et l'entraînement à vitesse variable. [17]

### II.8.1 Principe

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone  $\varphi_s$ ,  $\varphi_r$  au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple. [18]

### II.8.2 Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques. [24]

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{II.21})$$

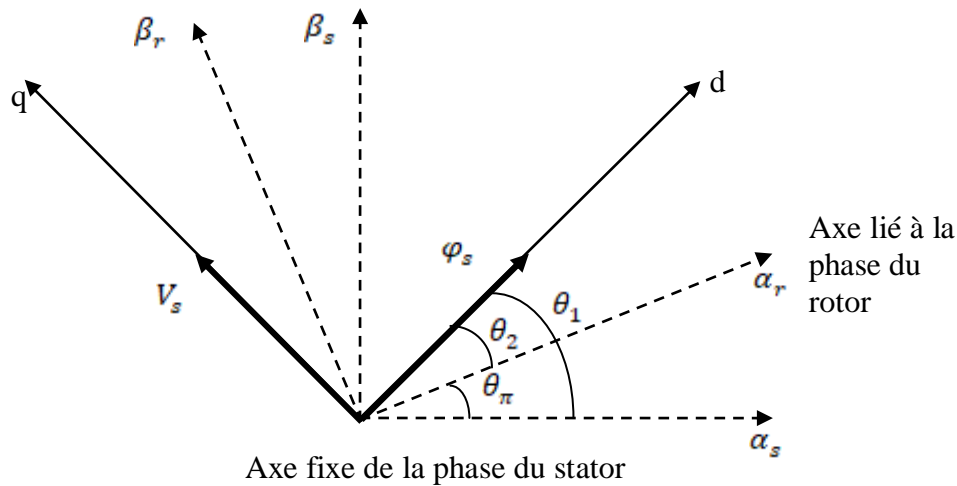


Figure (II. 9): Orientation du flux statorique sur l'axe d.

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\varphi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (II.22) montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la machine et par conséquent la Puissance active uniquement dépendants du courant rotorique  $I_{qr}$ .

De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes. [24]

Ainsi on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant (donc sa dérivée est nulle) [4]. On a :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

Ainsi les courants statoriques sont exprimés en fonction a des courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

D'après les équations (II.24) et (II.25) on a :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{II. 27})$$

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (II.26) les flux rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s} \\ \varphi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui ser ont appliqués à la machine.

Les expressions des flux rotoriques d'axe d et q de l'équation (II.28) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.15), on obtient alors

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Où :  $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$  représente le glissement de la génératrice.

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$  le coefficient de dispersion.

Finalement on obtient :

$$\begin{cases} I_{dr} = \left( \frac{-1}{R_r + p L_r \sigma} \right) [V_{dr} + (g \omega_s L_r \sigma) I_{qr}] \\ I_{qr} = \left( \frac{-1}{R_r + p L_r \sigma} \right) [V_{qr} + (g \omega_s L_r \sigma) I_{dr} - g \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

**Remarque :**

Le troisième terme dans les deux équations (II.29) peut être négligé car son influence est très faible [24].

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent [7], nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_{dr} I_{dr} - g\omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} = R_r + g\omega_s L_r \sigma I_{dr} + g\omega_s \frac{M}{L_r} \phi_s \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances, active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [24]

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

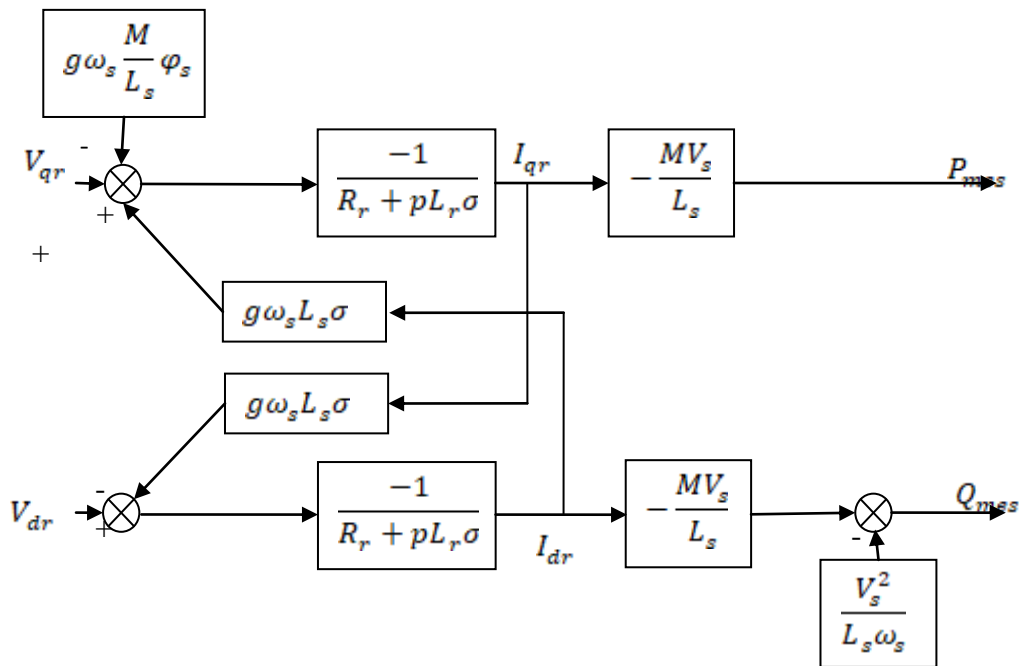
L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{ds}=0$ ) donne :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

D'après les équations (II.25), (II.26) et (II.33) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \psi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

A partir des équations précédentes nous pouvons élaborer un schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler :



**Figure (II. 10):** schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment 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.

### II.8.3 Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase). Deux méthodes ont été développées soit [21] :

La commande vectorielle directe.

La commande vectorielle indirecte.

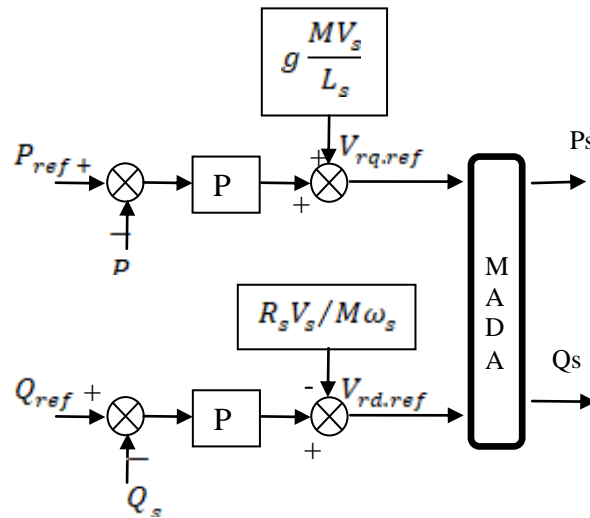
#### II.8.3.1 Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre...).

Cette commande n'est donc pas optimale. [21]



**Figure (II. 11):** Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

### II.8.3.2 Commande vectorielle indirecte :

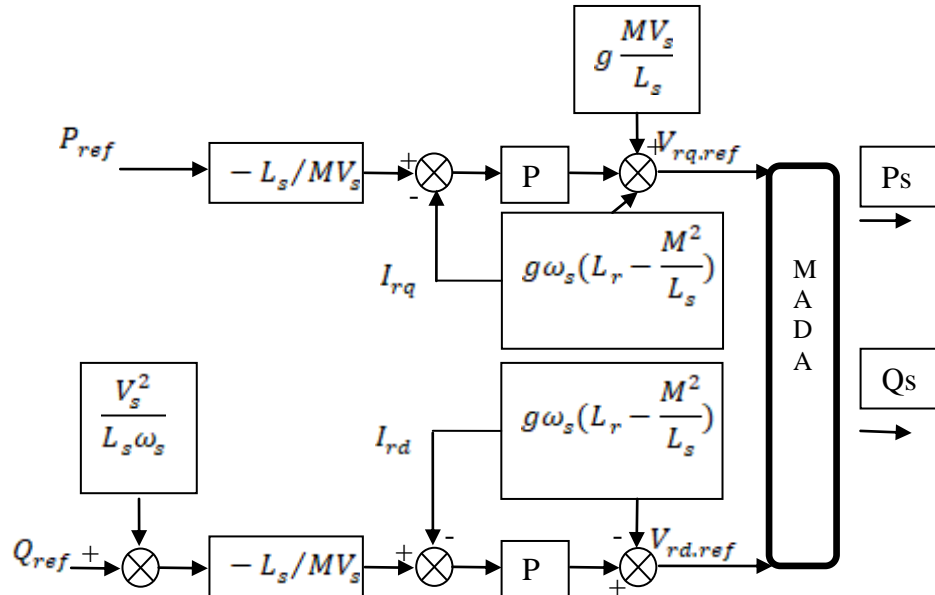
La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre. [21]

#### II.8.3.2.1 Commande indirecte en boucle ouverte :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure (II-12). [47]

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  qui

convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant  $I_r$  est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  en boucle fermée et les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  en boucle ouverte.

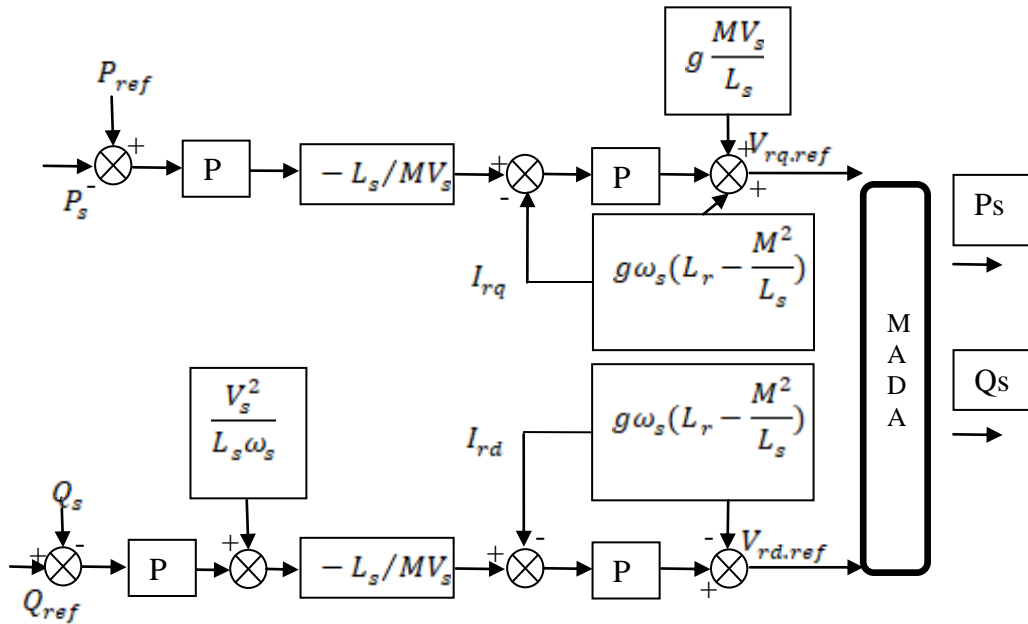


**Figure (II. 12):** Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.

### II.8.3.2.2 Commande indirecte en boucle fermée (Commande avec boucle de puissance):

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (II-11) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle. [47]

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants et les puissances et  $P_s$  en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure (II.13).



**Figure (II. 13):** Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.

Les gains des correcteurs dans la commande indirecte en boucle (ouverte et fermée) sont calculés de la même manière qu'à section.

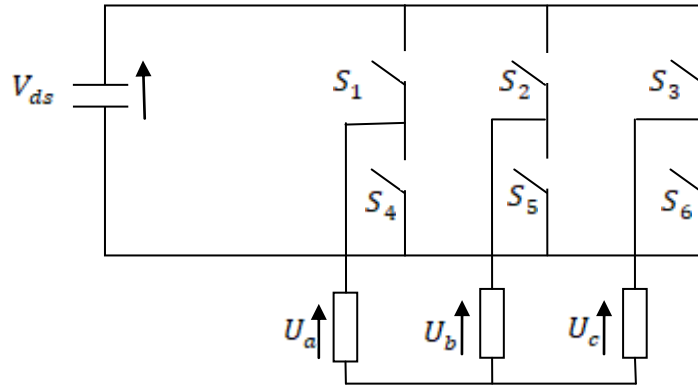
#### II.8.4 Type du régulateur PI

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants  $i_{dr}$   $i_{qr}$ . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre. Ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [10]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

#### II.8.5 Onduleur de tension a deux niveaux :

##### II.8.5.1 Modèle de l'onduleur a deux niveaux :

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel «  $S_i$  ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II.14).



**Figure (II. 14):** Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

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

- Branche1 :  
 $S_a=0$  Si  $S_1$  est ouvert et  $S_4$  est fermé.  
 $S_a=1$  Si  $S_1$  est fermé et  $S_4$  est ouvert.
- Branche2 :  
 $S_b=0$  Si  $S_2$  est ouvert et  $S_5$  est fermé.  
 $S_b=1$  Si  $S_2$  est fermé et  $S_5$  est ouvert.
- Branche3 :  
 $S_c=0$  Si  $S_3$  est ouvert et  $S_6$  est fermé.

$S_c=1$  Si  $S_3$  est fermé et  $S_6$  est ouvert.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

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

$$\begin{cases} V_a = 1/3 \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dr}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.}\nu 7)$$

### II.8.5.2 Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulé sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.13) (Figure II.14).[21]

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

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

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.}\nu 8)$$

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

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.}\nu 9)$$

### II.8.5.3 Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes: [21]

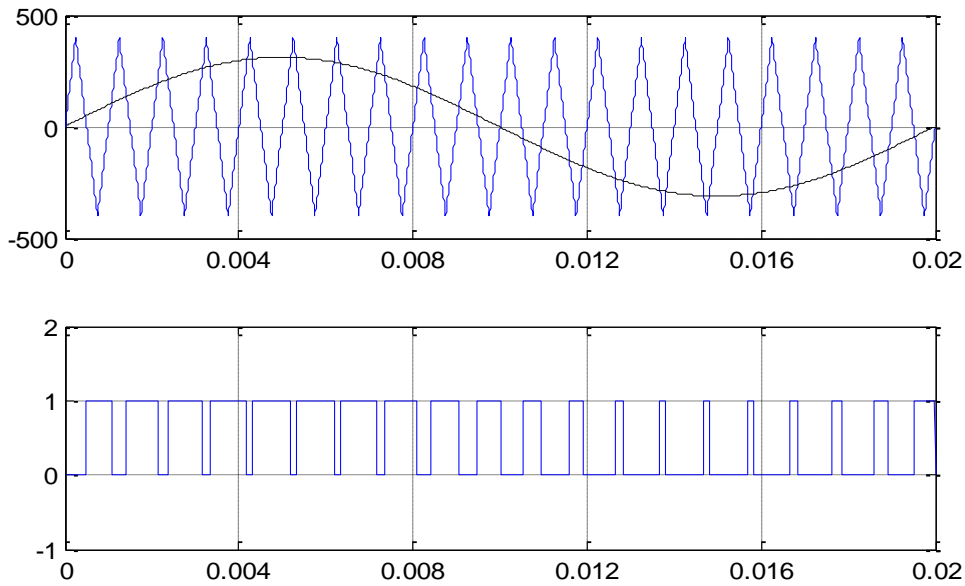
Tape 1:

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.}\xi \cdot)$$

Tel que  $V_{dc}$  est la tension du bus continue.

Tape 2:

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.41})$$




**Figure (II. 15):** Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse.

## II. 9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait Le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H.Park nous a permis de simplifier.

Pour contrôler la MADA nous avons utilisé une loi de commande vectorielle directe par un système d'orientation de flux statorique. Cette commande qui ramené les équations de modèle de la machine en deux équations permet de facilitée la commande de la machine à double alimentation.



**Chapitre III:**  
**Commande**  
**vectorielle MADA**  
**utilisées dans**  
**l'énergie éolienne**

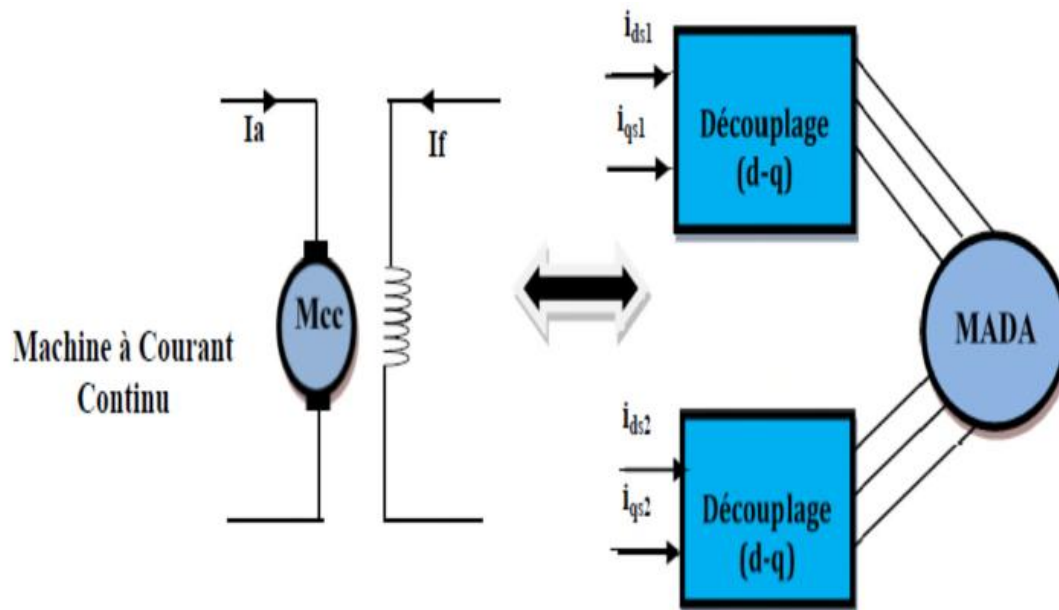
### III.1. Introduction:

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les deux éléments les plus importants, car la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement. Ce chapitre est consacré à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne. par la suite, différentes stratégies de commande sont décrites pour contrôler la puissance aérodynamique de la turbine. [31]

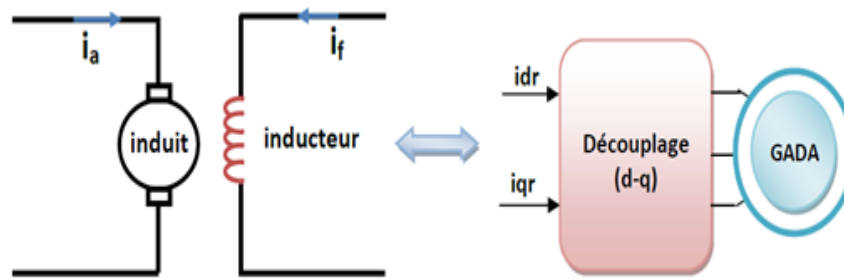
### III.2. Principe de La commande vectorielle par l'orientation du flux

La commande vectorielle est une méthode de contrôle des machines à courant Alternatif, son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes ( $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes ( $I_{qs}$ ) commande le couple et l'autre ( $I_{ds}$ )

Commande le flux. Ceci permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée.



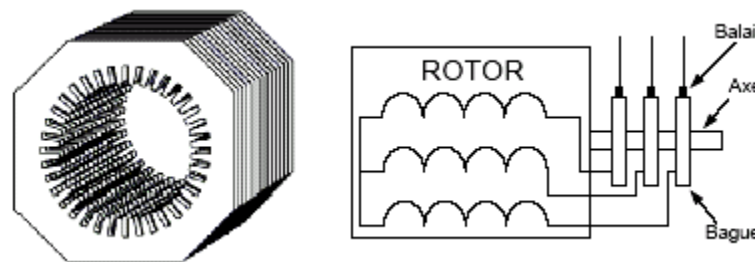
**Figure (III. 1):** Principe de la commande vectorielle.



**Figure (III. 2):** Principe de la commande vectorielle

### III.3. Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [44]. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure III.3)



**Figure (III. 3):** Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

### III.4. machines asynchrone à double alimentation : structure avec convertisseur MLI :

L'association d'un cyclo convertisseurs permet d'avoir une plage de variation de vitesse doublée par rapport aux autres structures. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone). Le principe de cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure, son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques qui nuisent au facteur de puissance de la machine, c'est pour cela qu'ils ont été remplacés par les convertisseurs commandés en MLI. Cette configuration a la même caractéristique que celle du cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistor IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermetures leur fréquence de

commutation est plus élevée que celle des GTO; l'utilisation de ce convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsion dont la modulation permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées). [43]

### **III.5. Stratégie de la commande de la machine asynchrone à double Alimentation :**

Pour tourner la machine à une vitesse optimale, pour une vitesse donnée du vent, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné .en utilisant la référence de la puissance active et réactive de la machine qui sont alors commandée. [44], [46]

Les différentes stratégies de commande de la MADA reposent sur deux approches pour effectuer une commande en puissance de cette machine :

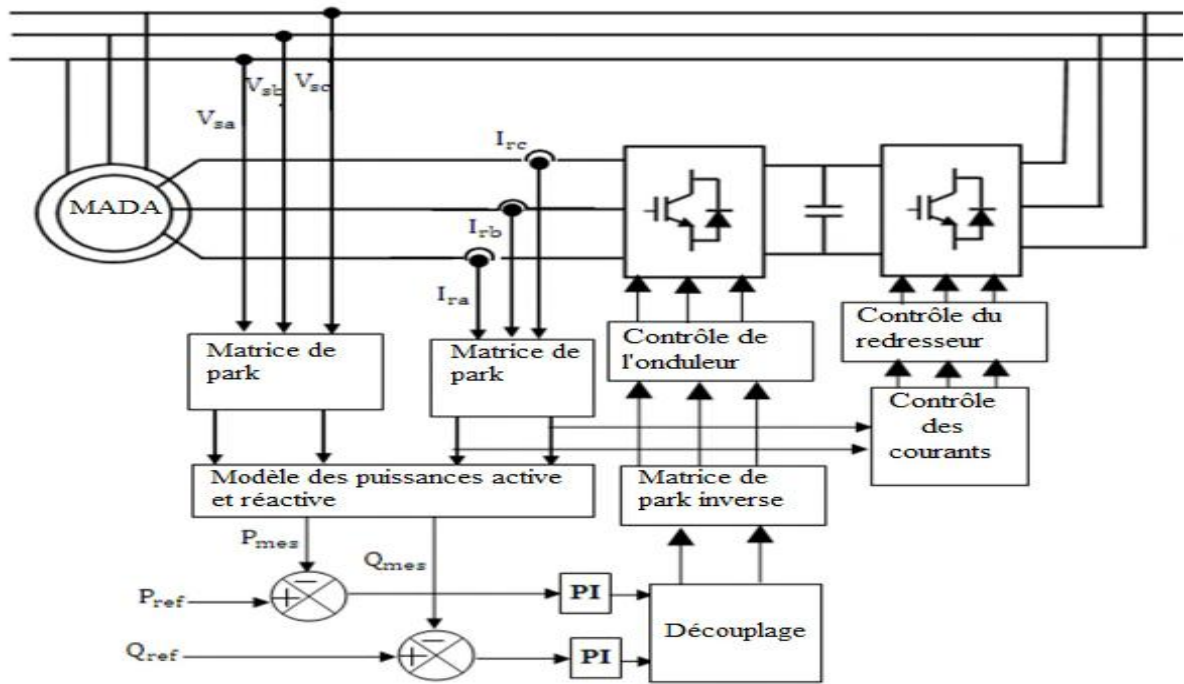
La première approche consiste a négliger les termes de couplage et mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment la puissance active et réactive. car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine. c'est la commande vectorielle de type direct.

La deuxième approche consiste à tenir en compte les termes de couplage et a les Compenser en effectuant un système comportant deux boucle permettant de contrôler les puissances et les courants rotorique. c'est la commande vectorielle de type indirect. La méthode qui va être étudié et simuler dans ce chapitre, c'est la commande direct cars a mise en œuvre est simple.

### **III.6. Modèle de la chaîne de conversion:**

#### **III.6.1. Schéma de commande:**

La figure (III.4) représente le schéma de principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation. La consigne de puissance active correspond à la puissance maximale extraite du vent.



**Figure (III. 4):** Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA.

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

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \tag{III. 1}$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \tag{III. 2}$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \tag{III. 3}$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors:

$$C_e = \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \tag{III. 4}$$

Le courant  $i_{qr}$  sera rendu variable par action sur la tension  $V_{qr}$ , le flux peut être contrôlé par le réglage du courant  $i_{dr}$ . Ce dernier est rendu variable par action sur la tension  $V_{dr}$  [40], [41]

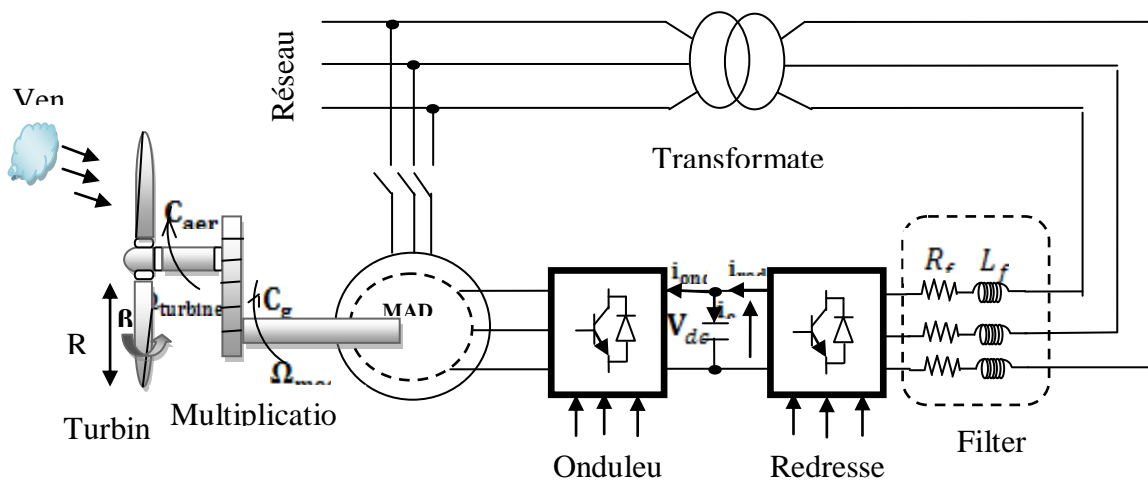
En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

### II.6.3. Architecture du dispositif de commande

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue, qui est fournie par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La structure montrée comporte deux convertisseurs à MLI, l'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations. [26]



**Figure (III. 5):** Modèle de la chaîne de conversion éolienne.

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

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

Le rotor de la MADA et entraîné par la turbine qui sera détaillée dans les paragraphes qui suit.

### III.6.4. Redresseur de tension

Le rôle du redresseur de tension est de fournir la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI permet le contrôle des courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance de réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées. [26]

#### III.6.3.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est à deux niveaux, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - idg \quad (\text{III. 9})$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons:

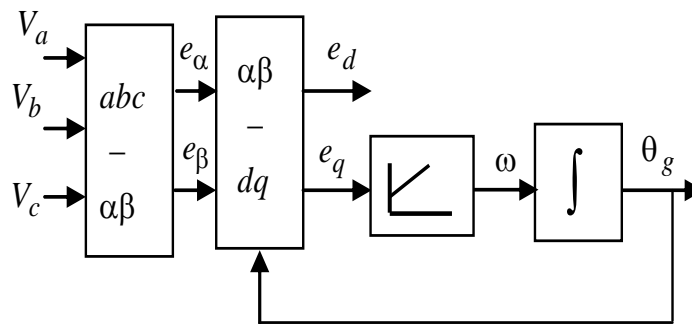
$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s L i_{qr} \\ V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_s L i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par le variable  $h_d$  et  $h_q$  :

$$\begin{cases} h_d = e_d - \omega_s L i_{qr} - V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ h_q = e_q + \omega_s L i_{dr} - V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

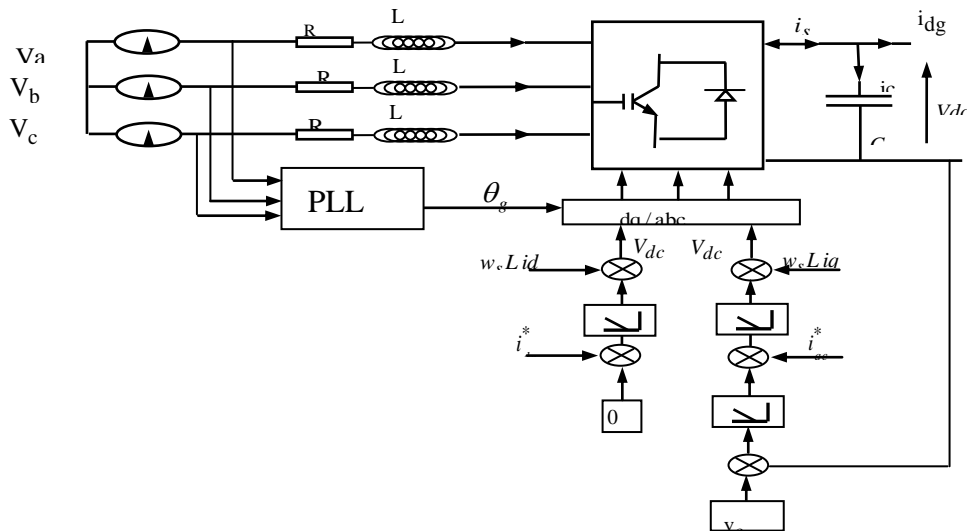
Il est possible de commander indépendamment les composants du courant  $i_d$  et  $i_q$  par action sur  $h_d$  et  $h_q$ , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La PLL sert essentiellement pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park de la phase équivalente d'un système triphasé. La PLL réalise la suivre de phase de la composante directe de la tension des réseaux  $e_d$ , afin d'éliminer la composante en quadrature,  $e_q$ , ce qui se produit lorsque la phase estimée,  $\theta_g$  est égale à la phase du réseau.



**Figure (III. 6):** Structure classique d'une PLL triphasée.

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC).



**Figure (III. 7):** Structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée

### III.6.3.2. Commande du redresseur

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence. [32]

### III.4. Filtre (côté réseau)

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

#### III.4.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau)

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [39].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res-d}(s)}{V_{res-d} - V_{red-d}} = \frac{I_{res-q}(s)}{V_{res} - V_{red-d}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III. 12)$$

### III.5. Types de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique

concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte.

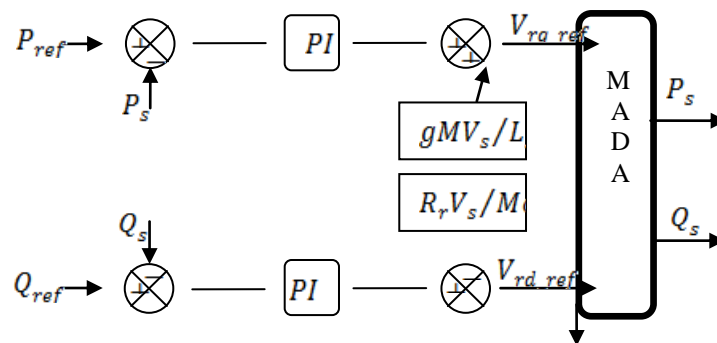
### III.5.1. Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale. [44]



**Figure (III. 8):** Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

### III.5.1. Commande indirecte :

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la

méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre. [46]

### **III.6. Modélisation de la turbine**

#### **III.6.1. La modélisation**

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent La surface balayée par le rotor.

##### **III.6.1.1. La surface balayée par le rotor**

La surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 600 KW est de quelque 1.500 m<sup>2</sup>, le diamètre du rotor étant d'environ 43 à 44 m. L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de  $2^2 = 2 \times 2 =$  quatre fois plus d'énergie.

##### **III.6.1.2. La densité de l'air**

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume. Où n'autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. [40]

##### **III.6.1.3. La Vitesse du vent**

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et diffèrent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

### III.6.1.4 Puissance récupérable par une turbine

La turbine qui comporte trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega$  turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ . La figure (III-9) montre le schéma d'une turbine éolienne. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air,  $m$ , qui se déplace avec la vitesse  $v$ , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III.13})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $S$ , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III.14})$$

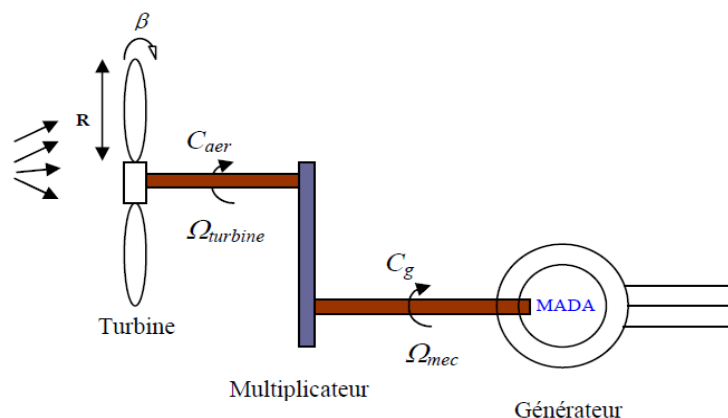
Avec:

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

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

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

$V_{\text{vent}}$  : est la vitesse du vent en (m/s).



**Figure (III. 9):** Schéma d'une turbine éolienne

D'après la relation on remarque que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, on ne peut pas extraire la totalité de la puissance car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient  $C_p$ , qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [41], [40], [18], La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda \beta) (\rho S v^3) \quad (III. 15)$$

$C_p$  : coefficient de puissance défini comme suit :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 + 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0,001 \quad (III. 16)$$

$\beta$  : angle d'orientation des pales.

$\lambda$  : est le ratio de vitesse défini comme:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III. 17)$$

Avec:

R:Longueur de pales

$\Omega_t$  :Vitesse de la turbine.

$V_{vent}$  : Vitesse de vent en (m/s)

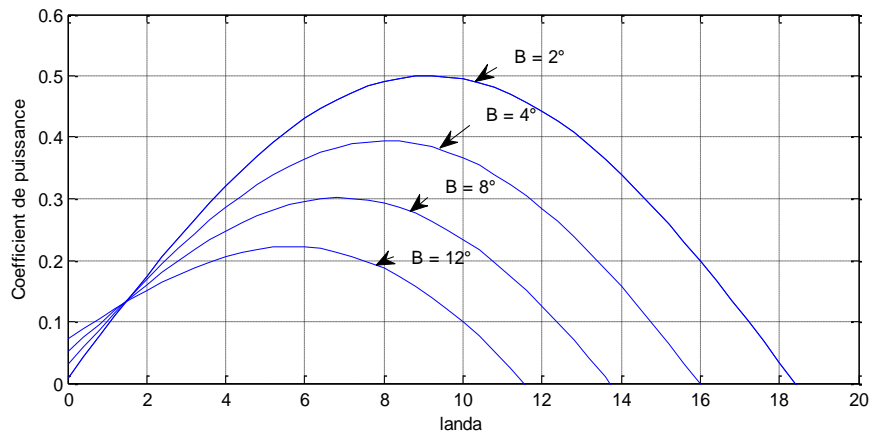
Le couple aérodynamique est donné par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 18)$$

### III.6.1.5. Le coefficient de puissance

Le  $C_p$  représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient présente un maximum de  $16/27$  soit  $0,59$  [18] [36]. C'est cette limite théorique appelée limite de B et z qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ .

Les caractéristiques de  $C_p$  en fonction de  $\beta$  pour différentes valeurs de l'angle de calage  $\beta$  sont illustrées sur la figure (III.10).



**Figure (III. 10):** Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

### III.6.1.6. Modèle du Multiplicateur:

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplications de l'ordre de 100. ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques. [22]

Le multiplicateur a pour rôle d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice, et pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse  $G$  qui correspond au rapport de multiplication.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III. 19)$$

Avec:

$C_g$ : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$ : Couple aérodynamique.

$G$ : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 20)$$

### III.6.1.7. Equation dynamique de l'arbre:

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [09] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (III. 21)$$

Avec:

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

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

$C_{mec}$ : Le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

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

Le couple de frottement visqueux  $C_v$  is.

Et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

### III.6.2. Schéma bloc du modèle de la turbine

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

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

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation. [18]

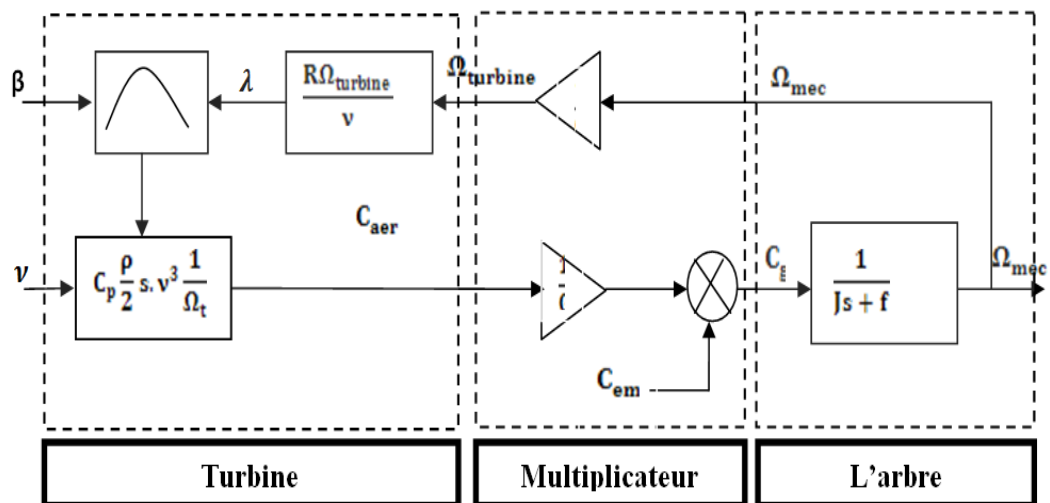


Figure (III. 11): Schéma bloc du modèle de la turbine

### III.7. Stratégie de commande de la turbine

Comme il est illustré sur la figure (III.12), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement

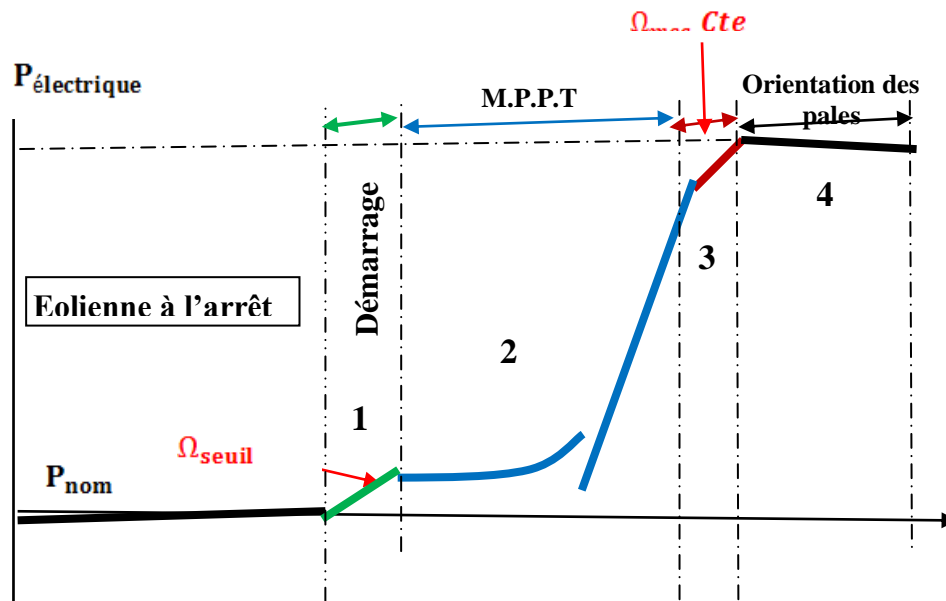


Figure (III. 12): Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

- **Zone1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- **Zone2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un  $C_p$  maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- **Zone3** : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale ( $P_{\text{nom}}$ ) .
- **Zone4** : Arrivée à la puissance nominale ( $P_{\text{nom}}$ ), une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (angle de calage), c'est le «**Pitch Control**» .
- Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

### III.8. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite

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

A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse. [32]

#### III.8.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III.22)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux  $C_{vis} \cong 0$ , on obtient :

$$C_{mec} = C_g \quad (III.23)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3 \quad (III.24)$$

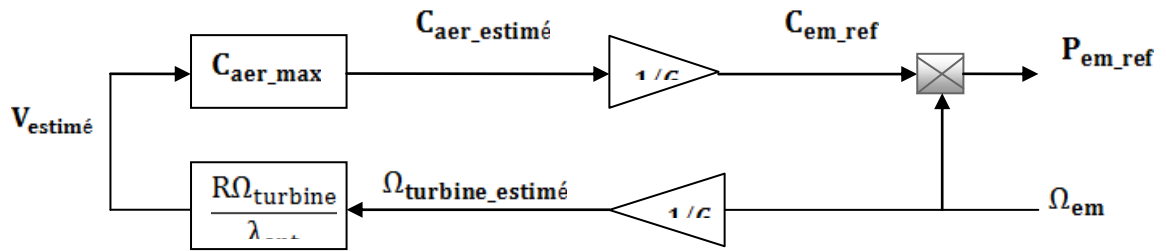
Avec :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} R}{\lambda} \quad (III.25)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{C_{pmax}}$ , qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$  et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{C_{pmax}}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (III.26)$$

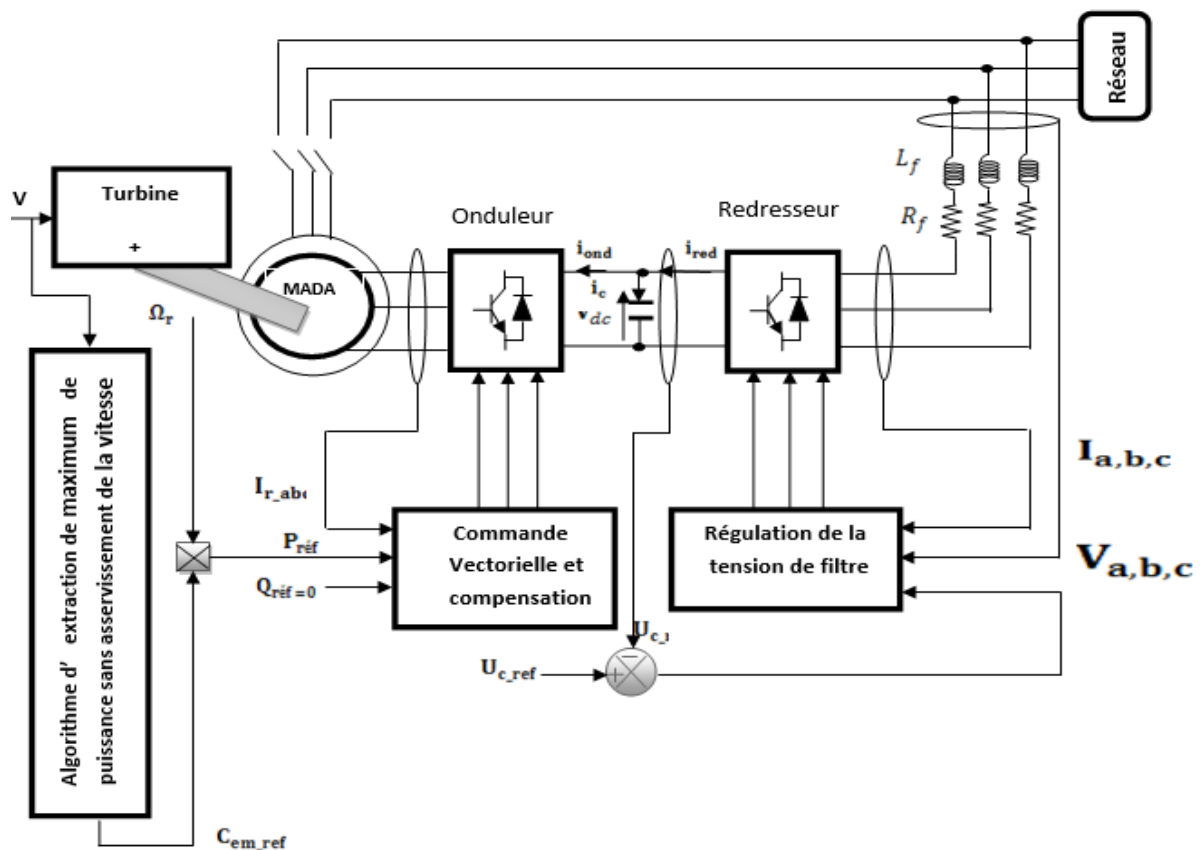
La figure (III.13) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.



**Figure (III. 13):** Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

### III.9. Système de la chaîne globale

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présenté sur la figure (III.14). [22]



**Figure (III. 14):** La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne

### III.10. Résultats de simulation

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab/Simulink, Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre. Différente vitesse de vent est appliquée sur les pales de l'éolienne. La tension de référence du bus continu, notée  $V_{dc}$ , est fixée à 800 V. La puissance réactive de référence  $Q_s$  est fixée à 0. Nous montrons que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment

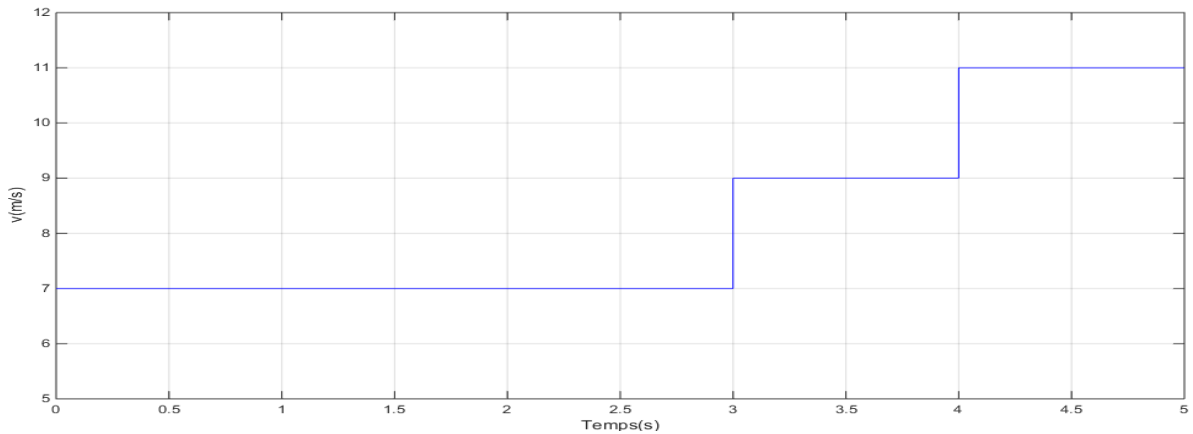


Figure (III. 15): Vitesse du vent

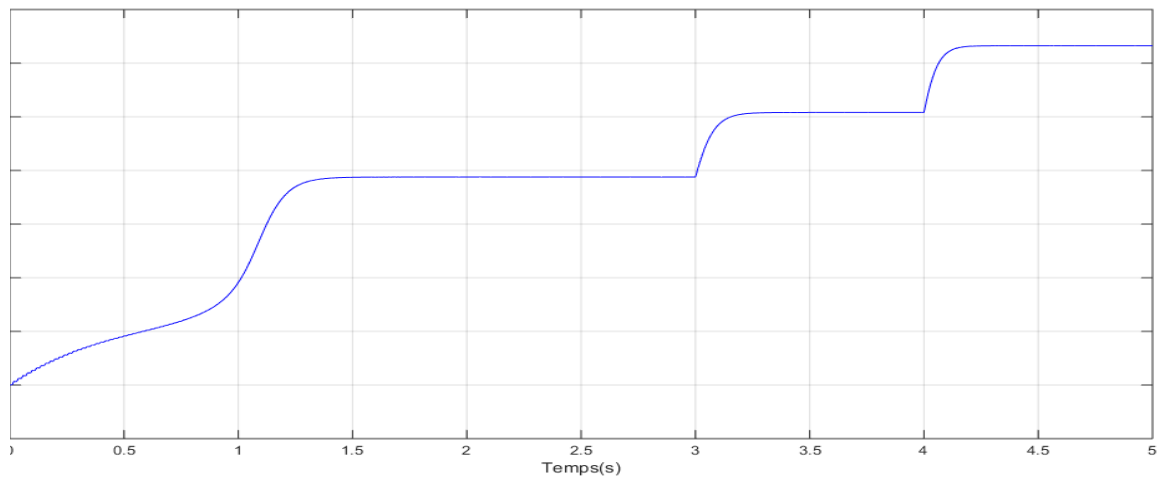
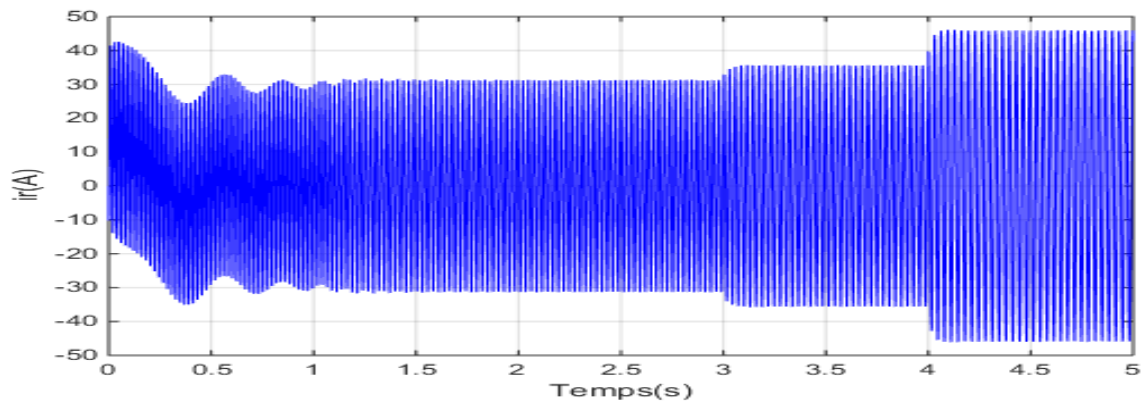
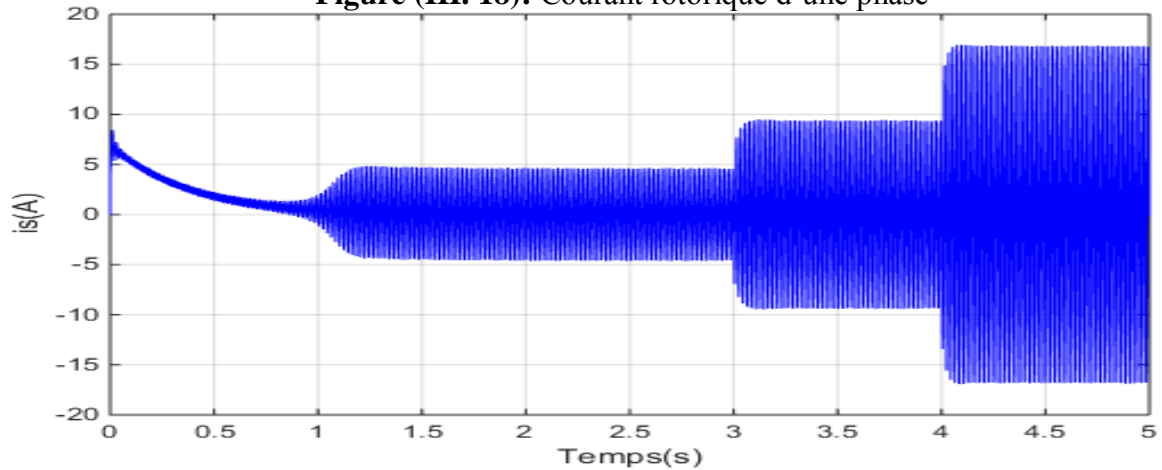


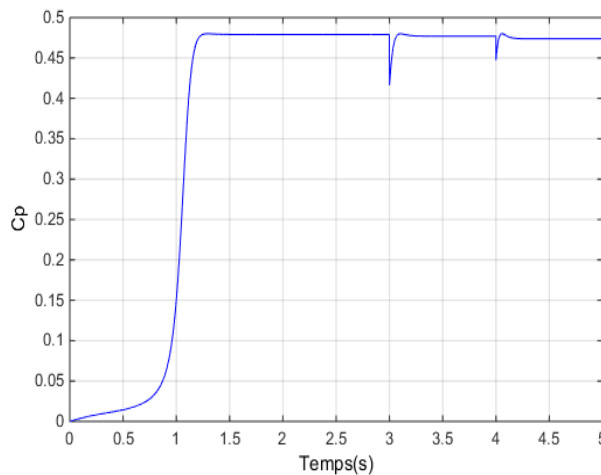
Figure (III. 16): Vitesse de rotation



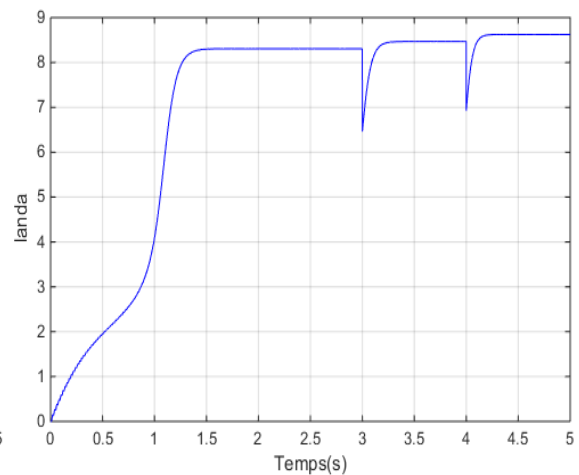
**Figure (III. 18):** Courant rotorique d'une phase



**Figure (III. 18):** Courant statorique d'une phase



**Figure (III. 19):** Vitesse relative de l'éolienne.



**Figure (III. 20):** Coefficient de puissance de la turbine

### III.11. Interprétations des Résultats

- la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références

optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

- pour minimiser le courant efficace appelé au réseau, on peut ramener le facteur de puissance à sa valeur maximale égale à 1 à travers la commande en puissance réactive nulle.
- On remarque que la vitesse stabilise et proportionnel à la vitesse de vent.

### **III.9. Conclusion**

Dans ce troisième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de convertisseur électronique à commande MLI. donc la structure est associée à la stratégie de commande vectorielle par orientation du flux statorique qui règle la puissance active et réactive, et recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse de la turbine.



**Chapitre IV:**  
**Commande sans**  
**capteur de vitesse**  
**d'un MADA**

## IV.1.Introduction

La commande de la MADA s'appuie sur la mesure de la mesure de ses courants statoriques et rotoriques, la vitesse ou la position du rotor, gradeurs physiques qui doivent fournir information suffisantes en qualité et en quantité de l'état de la machine.

La position du rotor ainsi que sa vitesse sont généralement obtenues à l'aide d'un codeur incrémental. Outre son cout, ce capteur pose. Entre autres. Les problèmes suivants :

- Pour ne pas avoir des erreurs de quantification importantes. Le codeur doit être suffisamment Précis.
- Pour pouvoir fonctionner dans des environnements hostiles, le codeur doit être protégé contre la poussière et les chocs mécaniques.
- Le codeur sera nécessairement logé entre la charge et l'arbre de la machine. Ceci va induire une augmentation de l'éloignement entre ces deux éléments, donc un accouplement élastique plus long. De plus, il doit supporter les à-coups des couples imposés par la machine.

Pour toutes ces raisons, il est intéressant d'étudier la suppression du capteur mécanique et de le remplacer par des estimateurs ou observateurs de la vitesse ou de la position basés sur la mesure des grandeurs électriques de la machine.

Nous étudions dans ce chapitre un estimateur par la méthode de MRAS (Model Reference Adaptive System).

## IV.2. Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique

### IV.2.1. Estimation de la vitesse avec modèle de la machine

- **Méthode à base d'estimateur**

Les estimateurs connus longtemps, s'appuient sur la duplication de modèle d'état dans la partie de commande afin de reconstruire les variables internes inaccessibles sur le système réel. Nombreuses sont les méthodes proposées dans la littérature qui traitent la commande sans capteur de vitesse de la machine. [31]

- **Méthode basée sur la loi d'autopilotage**

La méthode d'estimation de la vitesse utilise la loi d'autopilotage des machines électriques et peut être facilement implantée. Elle repose dans le cas de la machine asynchrone sur la

relation fondamentale entre les fréquences propres de la machine asynchrone. L'objectif de cette méthode est d'obtenir la vitesse électrique du rotor à partir des deux autres fréquences du moteur, qui peuvent être estimées. Ces estimations sont évaluées à partir des courants statoriques mesurés et des flux rotorique (courants magnétisants) estimés du moteur.

- **Système adaptatif avec modèle de référence MRAS**

Le Système Adaptatif à Modèle de Référence est basée sur la comparaison des sorties de deux estimateurs. Le premier, qui n'introduit pas la grandeur à estimer (la vitesse dans notre cas), est appelé modèle de référence et le deuxième est le modèle ajustable. L'erreur entre ces deux modèles pilote un mécanisme d'adaptation qui génère la vitesse. Cette dernière est utilisée dans le modèle ajustable. [47]

- **Méthode à base d'observateur**

Le problème posé par le traitement en boucle ouvert peut être évité en utilisant des observateurs afin de reconstituer l'état du système. En fait, un observateur n'est qu'un estimateur en boucle fermée qui introduit une matrice de gains pour corriger l'erreur sur l'estimation. Afin de pouvoir observer les grandeurs non mesurables de la machine, il est nécessaire que le système soit observable. Différentes structures d'observateurs d'état, ont été proposées en littérature. Elles sont très attractives et donnent de bonnes performances dans une gamme étendue de vitesse.[17]

- **Observateurs déterministes**

Dans la pratique, l'observateur déterministe prend deux formes différentes, observateur d'ordre réduit ou seulement les variables d'état non mesurables du système sont reconstruites, et l'observateur d'ordre complet pour lequel toutes les variables d'état du système sont reconstruites. Les observateurs présentent une entrée supplémentaire qui assure éventuellement la stabilité exponentielle de la reconstruction, et impose la dynamique de convergence. Les performances de cette structure dépendent bien évidemment du choix de la matrice gain.

- **Filtre de Kalman**

Une des méthodes utilisées pour l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone est le filtre de Kalman étendu (EKF) [32], Le filtre de Kalman est un observateur non linéaire en boucle fermée dont la matrice de gain est variable. A chaque pas de calcul, le filtre de Kalman

prédit les nouvelles valeurs des variables d'état de la machine asynchrone (courant statoriques, flux rotorique et vitesse). Cette prédiction est effectuée soit en minimisant les effets de bruit et les erreurs de modélisation des paramètres ou des variables d'état soit par un algorithme génétique [33]. Les bruits sont supposés blancs, Gaussiens et non corrélés avec les états estimés.

#### **IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine**

- **Estimation de la vitesse à partir des saillances de la machine**

Généralement, les machines à induction sont théoriquement conçues symétriques et ne doivent pas comporter de saillances. Donc la machine présente des saillances à cause des imprécisions de construction (comme l'excentricité), de l'existence des encoches rotoriques et du phénomène de saturation. Les saillances présentes dans une machine introduisent une variation spatiale des paramètres (résistance ou inductance), et permettent au courant ou à la tension de contenir des informations sur la position de ces saillances et par conséquent la position du rotor, donc une information sur la vitesse [34], [35]. On peut dénombrer diverses techniques pour l'estimation de la vitesse utilisant cette donnée physique de la machine liée à la présence de saillances. L'insensibilité vis-à-vis des paramètres de la machine constitue l'un des grands avantages pour ces techniques en contrepartie de l'exigence de moyens performants en termes de traitement du signal. Le défi reste donc dans la réalisation de l'estimation en temps réel, spécialement pour les commandes bouclées.

- **Estimation basée sur l'intelligence artificielle**

Les algorithmes génétiques, la logique floue et les réseaux neurones sont tous des techniques de calcul numérique à base d'intelligence artificielle, qui est populaire dans le domaine de l'informatique. Mais, de plus en plus, des applications à base de ces nouvelles approches de calcul numérique se développent pour des applications pratiques dans les domaines de la science et de l'ingénierie [33]. Les observateurs ou bien les estimateurs basés sur les techniques de l'intelligence artificielle amènent une meilleure dynamique, une meilleure précision et ils sont plus robustes [48], [49], [33]. Leurs robustesses sont très bonnes même pour des variations importantes des paramètres de la machine. Néanmoins, le besoin de la connaissance parfaite du système à régler ou à estimer et le manque de l'expertise sur système limitent les applications actuelles à une gamme bien spécifique.

### IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA avec modèle de la machine

#### IV.3.1. La méthode du MRAS

Le principe d'estimation par cette méthode repose sur la comparaison des grandeurs obtenues de deux façons différentes, d'un côté par un calcul ne dépendant pas explicitement de la vitesse (modèle de référence) et d'autre coté par un calcul dépendant explicitement de la vitesse (modèle adaptatif). Cette méthode développée par Schauder [49] , [17], [35] est connu sous le nom d'origine anglo-saxonne *Model Reference Adaptive System* (MRAS).

Pour l'estimation de la vitesse, il propose la comparaison de l'estimation du flux commun obtenu avec les équations statoriques (indépendantes explicitement de la vitesse) et d'autre part avec les équations rotoriques (dépendantes explicitement de la vitesse).

L'objectif est de trouver le paramètre vitesse du modèle adaptatif afin d'assurer les résultats des deux estimations de flux rotorique identiques. Ainsi la valeur de la vitesse estimée devient celle de la vitesse réelle. Le fonctionnement adéquat de l'estimation est assuré par un choix judicieux de la fonction d'adaptation pour faire converger le modèle adaptatif vers le modèle de référence à partir du critère de Popov. Le schéma de cette méthode a un inconvénient, elle utilise que des grandeurs observées de flux pour reconstruire la valeur de la vitesse. C'est pour cela qu'on préfère appliquer une autre approche proposée par Yang ,[31] qui considère les mesures des courants et les flux estimés comme grandeurs de sortie du modèle de référence (machine asynchrone réelle). Ce choix permet une meilleure précision étant donné que le modèle doit converger vers les grandeurs de sortie de la machine réelle.

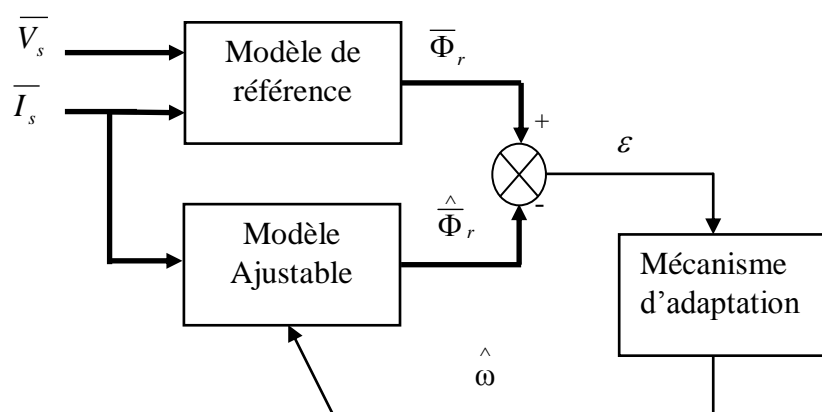


Figure (IV. 1): Schéma de principe de l'estimateur de MRAS.

### IV.3.2. Application à l'estimation de la vitesse de la machine asynchrone

L'exploitation de cette méthode pour l'estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage a été développée par SCHAUDER dans [47] et [44]. Dans son travail, il propose pour l'estimation de la vitesse le choix de deux modèles pour construire le flux rotorique :

**Modèle de référence** : qui ne dépend pas explicitement de la vitesse et qui est construit à partir des équations statoriques de la machine.

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha}^s}{dt} = \frac{L_r}{M_{sr}} \left( v_s \alpha - R_s i_{s\alpha} - \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) \\ \frac{d\varphi_{r\beta}^s}{dt} = \frac{L_r}{M_{sr}} \left( v_s \beta - R_s i_{s\beta} - \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) \end{cases} \quad (IV.1)$$

**Modèle de référence**: qui ne dépend pas explicitement de la vitesse et qui est construit à partir des équations statoriques de la machine.

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{T_r} (M_{sr} i_{s\alpha} - \varphi_{r\alpha} - \omega_r \varphi_{r\beta}) \\ \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{T_r} (M_{sr} i_{s\beta} - \varphi_{r\beta} - \omega_r \varphi_{r\alpha}) \end{cases} \quad (IV.2)$$

Les grandeurs d'entrée sont les deux tensions ( $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ ), les deux grandeurs de mesure sont les deux courants ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ), la fonction d'erreur choisie est  $\varepsilon$  (le choix d'une telle fonction d'erreur va lui permettre de vérifier la deuxième condition d'hyper stabilité de POPOV) et le mécanisme d'optimisation est un simple correcteur PI.

### IV.4. Application du MRAS à l'estimation des grandeurs mécaniques de la MADA

Dans le cas de la MADA, nous optons pour l'estimation de la vitesse du rotor à partir de deux modèles de couple électromagnétique, donc la vitesse du rotor est estimée à partir de la différence deux modèles suivant :

$$\bullet \text{ Modèle de référence } \begin{cases} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \\ I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Le couple électromagnétique est donné par l'équation

$$C_e = p \cdot M (i_{\beta s} \cdot i_{\alpha r} - i_{\alpha s} \cdot i_{\beta r}) \quad (IV.4)$$

• **Modèle adaptatif** 
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Le couple électromagnétique est donné par l'équation

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (IV.6)$$

L'erreur entre les deux modèles, fonction à minimiser, est donnée par :

$$\varepsilon(T) = \widehat{c}_e(t) - c_e(t) \quad (IV.7)$$

La loi d'adaptation présente une intégration en boucle ouverte (problème d'offset) pour l'amélioration de la réponse d'estimation un filtre passe bas à été proposé par des nombreux auteurs

$$\widehat{\omega} = K_p (\widehat{c}_e(t) - c_e(t)) + K_i \int (\widehat{c}_e(t) - c_e(t)) dt \quad (IV.8)$$

Avec :  $K_p, K_i$  des constantes positive.

La structure de la commande sans capteur de vitesse de la machine asynchrone double alimentation par la méthode d'estimation de la vitesse avec MRAS est montrée dans la figure(IV.3).

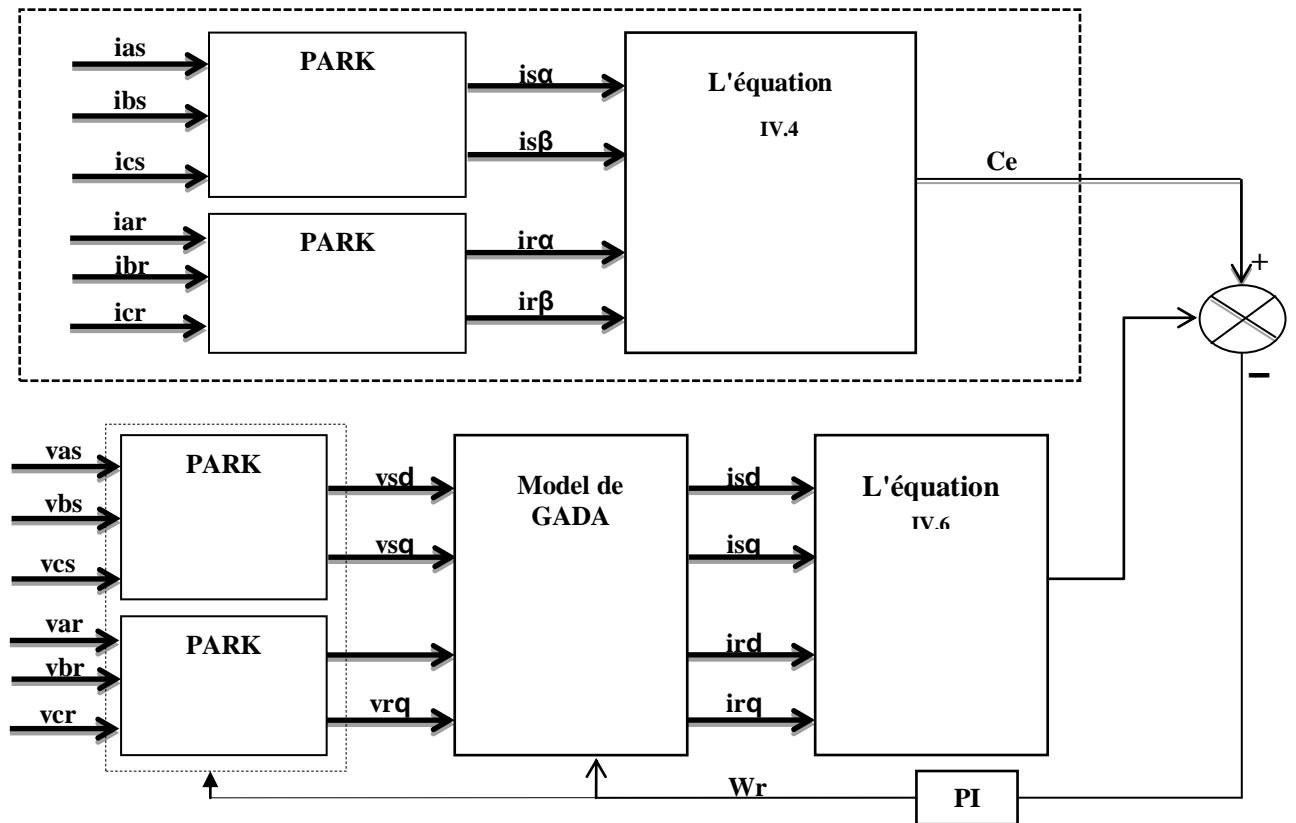
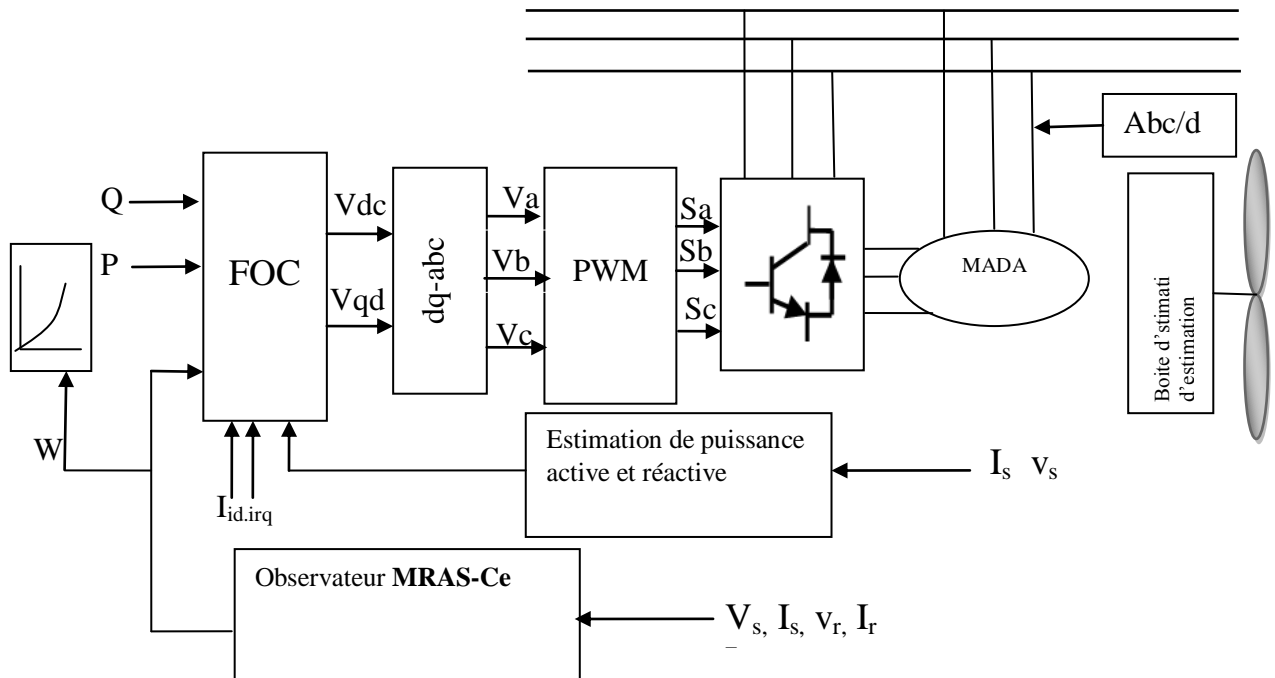


Figure (IV. 2): Schéma de principe d'un observateur MRAS basé sur

### IV.5. Schéma globale de la commande vectoriel de MADA sans capteurs

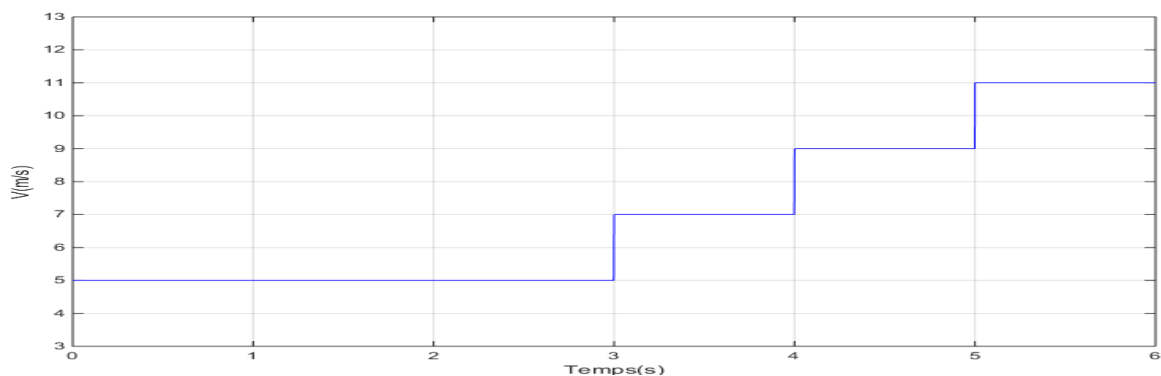
Le schéma global de la commande de MADA sans capteurs mécaniques est représenté sur la figure (IV.3).



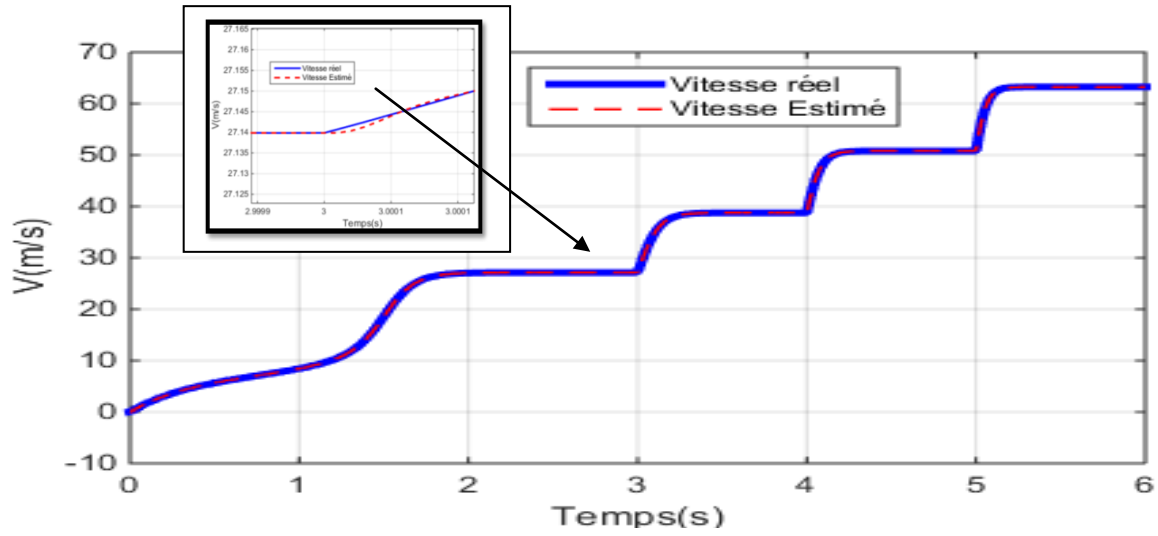
**Figure (IV. 3):** Commande sans capteur de vitesse mécanique de la GADA basée sur un observateur MRAS basé sur le couple électromagnétique.

### IV.6. Résultats de simulation

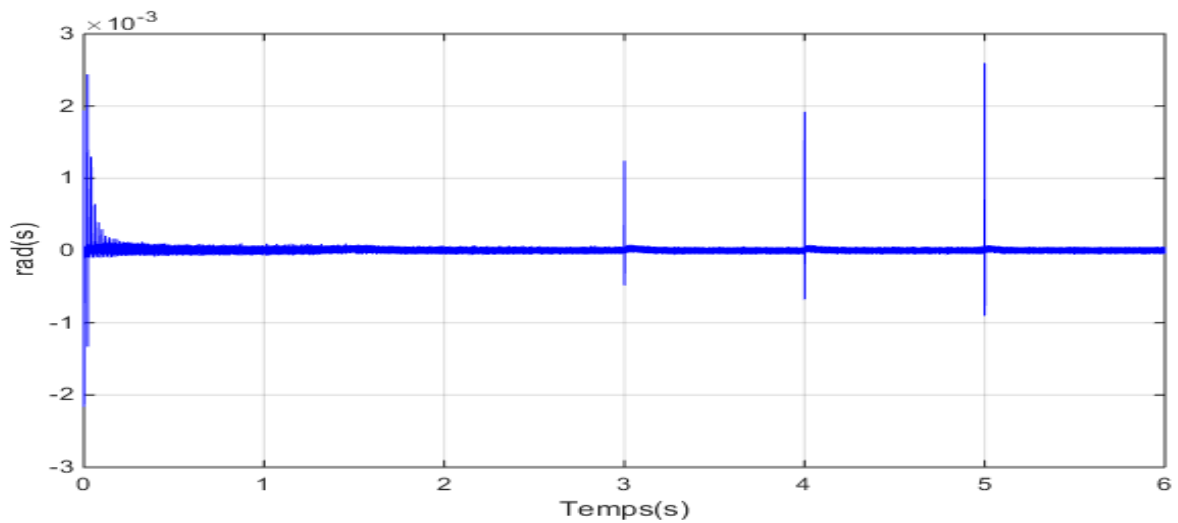
Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Afin de valider les contrôles étudiés on a varié le profil du vent appliqué sur les pales de l'éolienne de 5 jusqu'à 11 m/s.



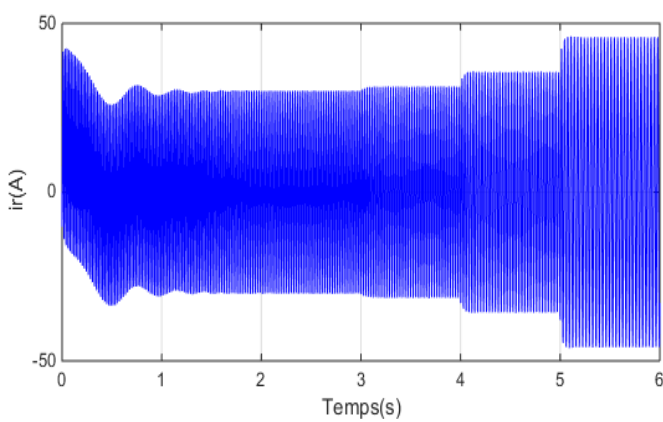
**Figure (IV. 4):** Vitesse de vent en fonction du temps.



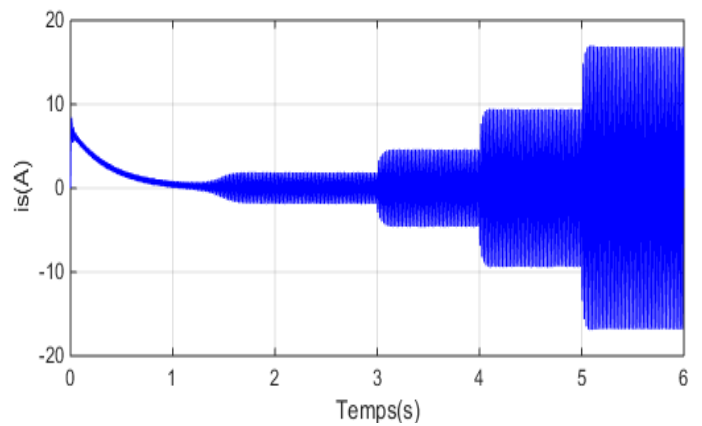
**Figure (IV. 5):** La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glissant adaptative avec Zoom



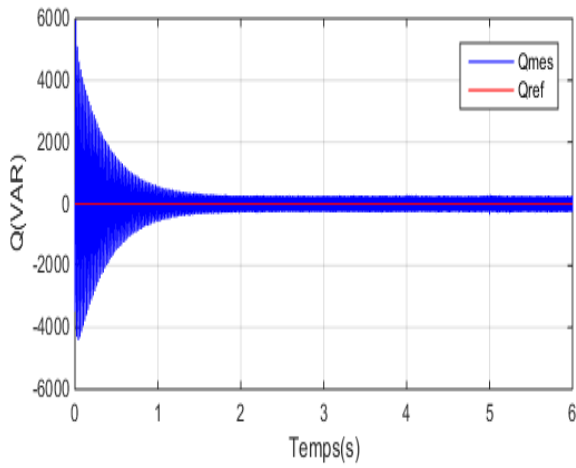
**Figure (IV. 6):** Erreur de la vitesse



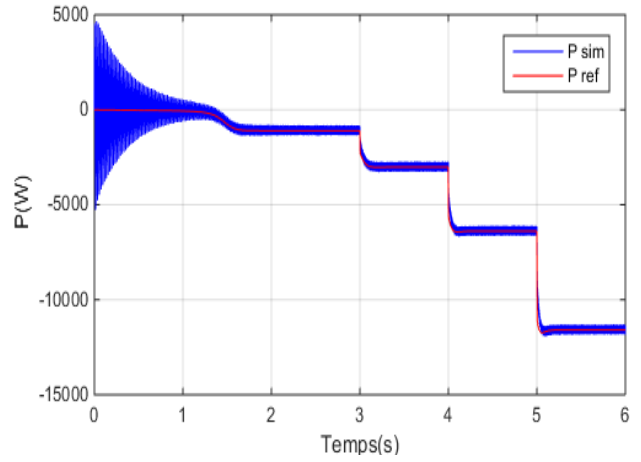
**Figure (IV. 7):** Courant d'une phase rotorique



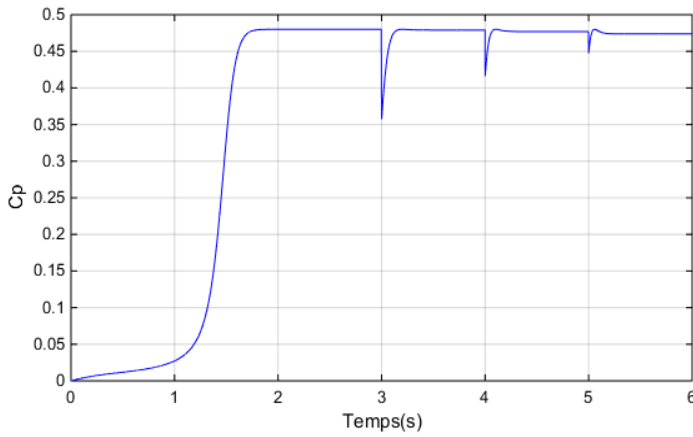
**Figure (IV. 8):** Courant d'une phase statorique.



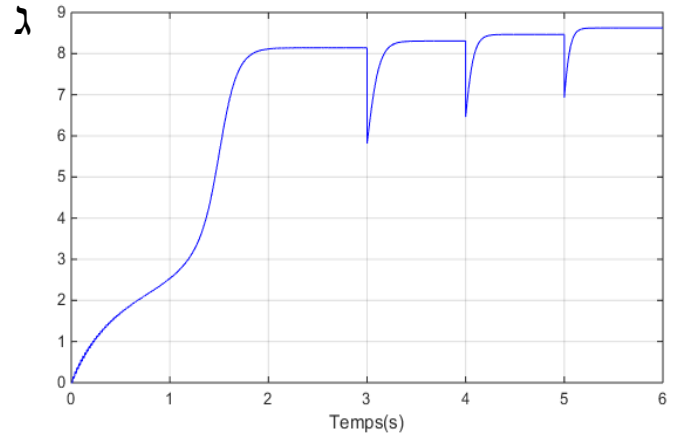
**Figure (IV. 9):** Puissance réactive statorique et sa référence



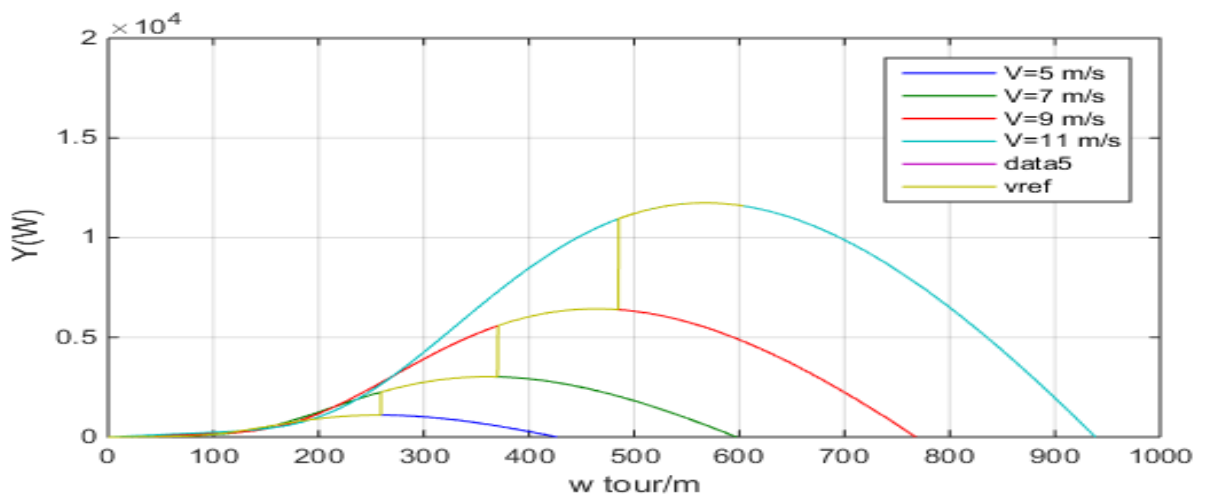
**Figure (IV. 10):** Puissance active statorique



**Figure (IV. 12):** Vitesse relative de l'éolienne



**Figure (IV. 12):** Coefficient de puissance de la turbine



**Figure (IV. 13):** MPPT de l'éolienne

### IV.7. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation permettent d'observer l'évolution de différentes grandeurs qui interviennent dans cet algorithme, où on distingue les remarques suivantes.

- on utilise la vitesse estimée comme entrée à la commande MPPT et la commande vectorielle.
- il est clair que la vitesse estimée suit fidèlement celles de la vitesse réelle dans différentes valeurs de vent.
- Le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne à plusieurs valeurs et le coefficient de puissance est obtenu donné leurs valeurs de références optimales ( $\lambda = 8.1$ ), le coefficient de puissance  $C_p$  restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales.
- L'allure des puissances active et réactive garantissant une commande vectorielle bien découplée de la DFIG. La puissance éolienne capturée suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil de vent appliqué, cette allure est conforme aussi par la trajectoire de puissance maximale. Cette méthode de contrôle permet de se rapprocher rapidement de la MPPT à l'aide de l'estimation de la vitesse de rotation  $w$ , c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse et réduit considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale.

### IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la méthode d'estimation de la vitesse par MRAS. Ensuite, le principe de observateur basé sur le couple électromagnétique ont été traité, Ces techniques sont exploitées dans une commande vectorielle sans capteur de vitesse.

Les résultats de la simulation obtenus pour l'estimation de la vitesse sont satisfaisants de point de vue erreur d'estimation, robustesse et stabilité du système d'entraînement global.

Concernant le fonctionnement à bases vitesses, ces résultats ont montré que la erreur de estimation de la vitesse par la MRAS basé sur le couple électromagnétique est tiré faible et montre une bonne réponse dynamique.



**Conclusion  
générale**

### CONCLUSION GENERALE

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne de petite puissance. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande avec et son capteur qui devait atteindre qui assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne. a travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

Le travail effectué est des performances et robustesse de la commande son capteur avec La commande vectorielle indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation permet d'avoir un découplage et un contrôle indépendant de la puissance active et réactive. Premièrement, la régulation est faite avec des régulateurs PI. Deuxièmement, la commande est à base de MRAS. L'architecture du command son capteur. Elle nous a permis d'une part, d'améliorer les performances dynamiques et statiques de la MADA et d'autre part, d'assurer une robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables en utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.



**Références  
bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Idriss Benlaloui, Saïd Drid, Senior Larbi Chrifi-Alaoui, and Mohammed Ouriagli "Implementation of a New MRAS Speed Sensorless Vector Control of Induction Machine" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 30, NO. 2, JUNE 2015
- [2] K.K. Prabhakaran, A. Karthikeyan✉ and F. Blaabjerg "Laboratory implementation of electromagnetic torque based MRAS speed estimator for sensorless SMPMSM drive" ELECTRONICS LETTERS 17th October 2019 Vol. 55 No. 21 pp. 1145–1147
- [3] K. K. Prabhakaran, Member, IEEE, and A. Karthikeyan, Senior Member, IEEE "Electromagnetic torque based MRAS speed estimator for sensorless SMPMSM drive" This article has been accepted for publication in a future issue of this journal, but has not been fully edited. Content may change prior to final publication. Citation information: DOI 10.1109/TIE.2020.2965499, IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable).
- [5] Pierre Pétrequin, Rose-Marie Arbogast, Anne-Marie Pétrequin, Samuel Van Willigen, Maxence Bailly, *Premiers chariots, premiers araires : La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires avant notre ère*, Paris, CNRS, coll. « Recherches Archéologiques », 16 novembre 2006, 397 p.
- [6] (de) BMWi, «Zahlen undFakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung» [archive], sur Ministère fédéral de l'Économie (Allemagne), 9 septembre 2019 (consulté le 27 janvier 2020).
- [7] Benchaïb ;A. ; Application des modes de glissement pour la commande en temps réel de la machine asynchrone",Thèse de Doctorat del'Université de Nantes,2001.
- [8] N.Cherfia,"conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [9] Bouaraki Mouloud, «Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamedbougara-boumerdes, 2012.
- [10] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.

## Références bibliographiques

---

- [11] I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", thèse de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [12] Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de Magister API, Université de TLEMCEM, 2011.
- [13] N. abu-tabak. «Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [14] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [15] KOUZI, K. (2008). Contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif (Thèse de Doctorat, Université de Batna 2).
- [16] Mr HOCINI Yacine «COMMANDE D'UNE GENERATRICE POUR ENERGIE EOLIENNE » MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2013.
- [17] L. BAGHLI, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [18] S Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une Mada », thèse de Magister, École nationale polytechnique Alger 2009.
- [19] L. khettache, "Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [20] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable» thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [21] MOUSSAOUI Taha Yacine et HADA Mounir «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued, 2015.
- [22] M.A.HASSAD, «Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques», thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012

## Références bibliographiques

---

- [23] L.khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine
- [24] M<sup>me</sup> Kelkoul Bahia «Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation» Mémoire de Magister API, Université de TLEMCEM, 2011.
- [25] KADDOURI SADOK DAIB M. SALAH et RADDAD ABDELKARIM «Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par Mode de Glissement » Mémoire de Fin d'études pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'état en électrotechnique, Centre Universitaire d'El-oued, 2011.
- [26] Y. Elbia, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [27] S. Drid, "Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation," Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna, Algérie, 2005.
- [28] L. Leclercq, B. Robyns, J.M. Grave, "Control Based on fuzzylogic of a flywheelenergystorage system associatedwithwind and diesel generators", Mathematics and Computers in Simulation, vol.63, issue 3-5, 2003, pp.271-280 ].
- [29] Adam MIRECKI, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, » INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.
- [30] T. Kruger, B. Anderson, «Advance control strategy for variable speed wind turbine «European Wind Energy conference 2001, Copenhagen, Danemark, pp.983-986.
- [31] A. bouhedda, "contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "thème de magister d'université Mouloud Mammeri, tizi-ouzou, 2011
- [32] A. Boyette., "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.

## Références bibliographiques

---

- [33] A BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", thèse de magister, université de Constantine, 2009
- [34] A GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", thèse de doctorat de l'Ecole Henri Poincaré, 2010
- [35] Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani "Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer" World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug 2011, Vol. 80, p 920
- [36] N. Laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [37] B. Beltran, "contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice Asynchrone Double alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode glissant D'ordre supérieur" thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010
- [38] A. Bouhedda, "contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne" thème de magister d'université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011.
- [39] B. Toual "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable" thèse de magister de l'Université
- [40] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [41] CHERIF, "Modélisation de Générateur Asynchrone à Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [42] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [43] WILDI. SYBILLE « électrotechnique » ; 4eme Edition ; de boeck.
- [44] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003

## Références bibliographiques

---

- [45] Khelfat Lotfi et Maataoui Lakhdar « “Étude et Simulation d’une éolienne à base d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée » MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA,2007.
- [46] Aggoun Ghania : « étude qualitative de l’association convertisseur machine pour l’entraînement électrique d’un système de génération éolienne » Thèse magister en Electrotechnique de l’université de Tizi-Ouzou (14 sept 2011)
- [47] F.Merrahi , "Alimentation et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l’énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007
- [48] A.S.Belfodhal,"modélisation et commande d'une chaine éolienne avec intégration des stockage Inertiel ",thèse de magister ,Ecole militaire polytechnique
- [49] M.Bouaraki "Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbin éolienne à vitesse variable :Application sur un site à TINDOUF",thèse de magister de l'université M'hamedbougara,boumardas,2011
- [50] Paul-Etienne V.,“ Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, ” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.



# **ANNEXES**

## Annexe(A)

**1.machine à induction double alimentée :**

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	7,5 KW
Résistance statorique	0.474 ( $\Omega$ )
Résistance rotorique	0.7614 ( $\Omega$ )
Inductance mutuelle	0.107 (H)
Inductance statorique	0.12 (H)
Inductance rotorique	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220 V
Fréquence du réseau	50 Hz

**Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	3 m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0,5 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	0.0024 N.m.s/rad

**Paramètres de la redresseur :**

$r = 0,3 \Omega$  ,  $l = 14e-3$  H ,  $c = 2e-3$  F.

## Annexe (B)

## Calcul des paramètres du régulateur PI [37]

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (B.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

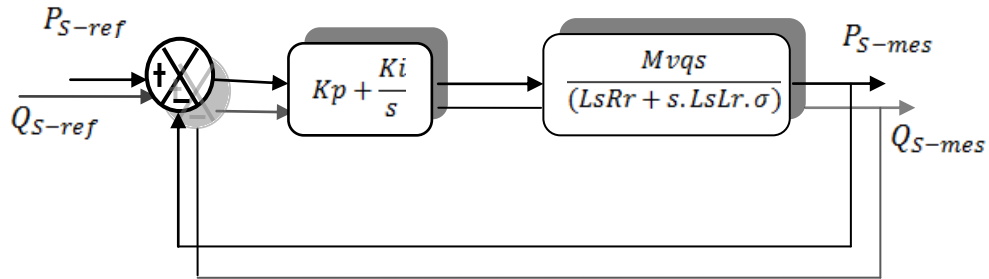


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

$$\text{Avec} \quad \sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte ( $F_{BO}$ ) du système de régulation de la figure (B.1) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction  $F_{BO}$  suivante :

$$F_{BO} = \frac{K_P Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma \cdot s}$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_p M v_{qs}}$$

$\tau$  est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_p = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M v_{qs}}$$

$$K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M v_{qs}}$$

On applique le même méthode sur :

↪ Boucle des courants

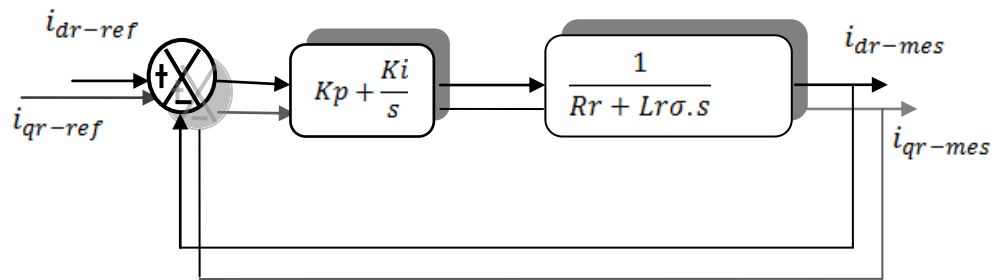


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique .

↪ Boucle de vitesse

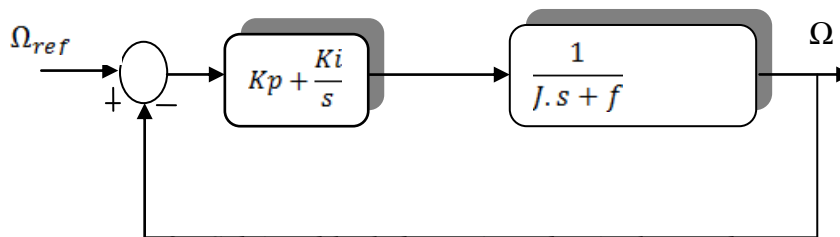


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

Paramètres du régulateurs PI classique :

Régulateurs des puissances	Régulateurs des courants
$K_p = 710.64$	$K_p = 200$
$K_i = 8894.5$	$K_i = 0$