



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
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: Réseaux Électriques

Thème

**Commande vectorielle sans capteur de
GADA par observateur mode glissant**

Réaliser par:

- FARFOUR Fatima
- KEZZOUZ Fatma
- SAKER Sara

Diriger par:

- Dr: SERHOUD Hicham

2018/2019

Table des matières

Résumé:.....	IV
<i>Remerciement</i>	I
Table des matières	I
Notations symboliques	VI
Liste des Figures.....	IX
Introduction Générale.....	1

Chapitre I: Généralité sur l'énergie éolienne

I.1.Introduction.....	2
I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne	2
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.2.2. Principaux composants d'une éolienne	3
I.3. Les différents types d'éoliennes.....	5
I.3.1. Eoliennes à axe vertical	5
I.3.2. Eoliennes à axe horizontal	6
I.4. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	6
I.4.1. Bilan des forces sur une pale	6
I.4.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	7
I.5. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	8
I.5.1. Fonctionnement à vitesse fixe	8
I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	9
I.6. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.....	10
I.6.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif	10
I.6.2. Systèmes couplés au réseau alternatif	11
I.8. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne.....	15
I.8.1. Avantages	15
I.8.2. Inconvénients.....	16
I.9. Conclusion	17

Chapitre II: Modélisation et commande vectorielle de la MADA

II.1. Introduction	18
II.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation	18
II.3. Structure de la machine	18
II.4. Modes de fonctionnement de la MADA.....	19
II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	19
II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	19
II.4.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	19

II.4.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	19
II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	20
II.6. Domaines d’application de la MADA.....	21
II.7. l'application de la MADA dans les systèmes éoliens	21
II.8. Avantages et inconvénients de la MADA	22
II.8.1. Avantages de la MADA	22
II.8.2. Inconvénients de la MADA.....	23
II.9. Modélisation de la MADA.....	23
II.9.1. Hypothèses simplificatrices.....	24
II.9.2.Modèle mathématique de la MADA	24
II.9.3.Modèle diphasé de la MADA.....	26
II.10.Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation.....	28
II.10.1.Principe.....	28
II.10.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique.....	29
II.10.3.Commande vectorielle de la MADA.....	29
II.10.4.contrôle indépendant des puissances active et réactive.....	32
II.10.4 .1.Commande directe.....	32
II.10.4.2.Commande indirecte	33
II.10.5. Onduleur de tension a deux niveaux	35
II.11. Simulation de la commande de la MADA.....	37
II.12.Interprétations des Résultats	40
II.13.Conclusion	41
ChapitreIII: Commande du système éolien à vitesse variable basé sur MADA	
III.1. Introduction	42
III.2. Modèle de la chaîne de conversion	42
III.2.1. Architecture du dispositif de commande	42
III.2.2. Redresseur de tension	43
III.3. Filtre (côté réseau).....	45
III.3.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau).....	45
III.4. Modélisation de la turbine	46
III.4.1. La modélisation.....	46
III.4.2. Schéma bloc du modèle de la turbine	50
III.5. Stratégie de commande de la turbine	51
III.6. Système de la chaîne globale	52
III.7. Résultats de simulation.....	52
III.8. Interprétations des Résultats.....	55
III.9. Conclusion.....	56

ChapitreIV:Commande sans capteur de la GADA intégré dans un système éolienne	
IV.1. Introduction.....	57
IV.2.Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique.....	57
IV.2.1.Estimation de la vitesse avec modèle de la machine	57
IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine.....	58
IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA par observateur adaptatif mode glissant.....	59
IV.6.Résultats de simulation	63
IV.7. Interprétation des résultats	66
IV.10. Conclusion	66
Conclusion Générale	66
Références bibliographiques	67
Annexes	70

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 les puissance est développée par l'appliquant 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 criterion witch 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.

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: HICHAM Serhoud, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelle,

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

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	Ω
R_r	Résistances rotorique	Ω
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
β	Angle de calage des pales	$^{\circ}$
Ω	vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
Ω_{ref}	vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique .	Rd
θ_s	Position de stator	Rd
θ_r	Position électrique de rotor	Rd
Λ	Vitesse spécifique	
λ_{cpmax}	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne	
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	rd/sec
ω_s	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
Φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	Wb
Φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	Wb
Φ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q)	Wb
Φ_{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
Ω_{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	Parameter integrator
K_p	Parameter proportional
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	Control à tension orientée
h_a et h_d	la largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive.

Liste des Figures

Figure(I-1): Conversion de l'énergie cinétique du vent	2
Figure(I-2): Principaux organes du système de conversion éolien.....	3
Figure (I-3):Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne	4
Figure (I-4): Eolienne à axe vertical.....	5
Figure (I-5): Eolienne à axe horizontal.....	6
Figure (I-6): Bilan des forces sur une pale	6
Figure (I-7): Flux d'air sur un profil de pale "stall"	7
Figure (I-8): Variation de l'angle de calage d'une pale	8
Figure (I-9): Aérogénérateur à vitesse fixe.....	9
Figure (I-10): Aérogénérateur à vitesse variable	10
Figure (I-11): Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.....	10
Figure (I-12): Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique.	11
Figure (I-13): Contrôle de glissement par l'énergie dissipée.	12
Figure(I-14): Structure de Kramer pour la MADA.	13
Figure (I-15): Structure avec deux ponts à diodes et à transistors.....	14
Figure (I-16): Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.....	14
Figure (I-17) Structure avec convertisseurs à MLI.	15
Figure (II-1): Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.....	18
Figure (II-2):Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	20
Figure (II-3): Eolienne installée en mer.	21
Figure (II-4) : Schéma de principe d'un aérogénérateur à base de la MADA.....	22
Figure (II-5) : Représentation simplifié de la MADA.	24
Figure (II-6): Modèle de PARK de la MADA	26
Figure (II-7): Représentation de la machine dans le repère diphasé.	27
Figure (II-8): Orientation de flux statorique.....	29
Figure (II-9): Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	32
Figure (II-10): Schéma bloc de la commande directe.	33
Figure (II-11): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	34
Figure (II-12): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.	34
Figure (II-13): Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.	35

Figure (II-14): Principe de fonctionnement de la technique MLI triangule sinusoïdale à une porteuse.....	37
Figure (II-15): Schéma bloqué de la modèle de la commande vectorielle de GADA.....	38
Figure (II-16): Vitesse de rotation de la MADA.....	38
Figure (II-17) Flux statorique de la MADA	38
Figure (II-18): Puissance active de la MADA.....	39
Figure (II-19): Puissance réactive de la MADA.....	39
Figure (II-20): Courant statorique Iqs- Ids de la MADA	39
Figure (II-21) :Courant rotorique Iqr- Idr de la MADA.....	40
Figure (II-22): Tension aux bornes de l'onduleur de la MADA	40
Figure (III-1): Modèle de la chaîne de conversion éolienne.	42
Figure (III-2): Structure classique d'une PLL triphasée.	44
Figure (III-3): Structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée.....	45
Figure (III-4): Schéma d'une turbine éolienne	47
Figure (III-5): Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe).....	49
Figure (III-6): Schéma bloc du modèle de la turbine	50
Figure (III-7): Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne	51
Figure (III-8): Structure de la chaîne globale	52
Figure (III-9) : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA	54
Figure (IV-1): Configuration de l'observateur adaptative de mode glissant.	62
Figure(IV-2): Commande sans capteur de vitesse mécanique de la GADA basée sur un observateur adaptatif mode glissant dans un système éolien à vitesse variable.....	63
Figure (IV-3): Vitesse de vent en fonction du temps	64
Figure (IV-4): La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glissant adaptatif avec Zoom.....	64
Figure (IV-5): Erreur de la vitesse estimée	64
Figure (IV-6): Puissance active statorique	65
Figure (IV-7): Puissance réactive statorique et sa référent sa référence	65
Figure (IV-8): Courant d'une phase statorique.....	65
Figure (IV-9) : Courant d'une phase rotorique.....	65
Figure (IV-11): Vitesse relative de l'éolienne	65
Figure (IV-10): Coefficient de puissance de la turbine	65
Figure (IV-12): MPPT de l'éolienne.....	65

Introduction
Générale

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à redévelopper fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée.

L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître sur tout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc.

La conversion d'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée par divers types de machines. A l'origine, c'était la génératrice asynchrone classique, sans convertisseur d'électronique de puissance associé, qui était la plus largement répandue. Cependant, l'évolution technologique des convertisseurs a progressivement permis de se tourner vers des dispositifs plus complexes.

Dans ce travail consiste à l'étude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation à mode glissant, débitant sur un réseau:

- ✓ Le premier chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Et différentes machines électriques Ce qui nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.
- ✓ Le second chapitre est consacré à la description et classification des machines à double alimentation, principe de fonctionnement, la modélisation et la simulation de cette machine, ainsi que leurs applications dans les systèmes éoliens.
- ✓ Au troisième chapitre, nous aborderons la commande du système éolien à vitesse variable basé sur un MADA.
- ✓ Le dernier chapitre présente la commande sans capteur par observateur adaptatif - mode glissant de la chaîne de conversion éolienne qui basée sur la machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable.

*Généralité sur
l'énergie éolienne*

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 [1]

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 au différentes machines électriques et plus spécifiquement la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).

I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

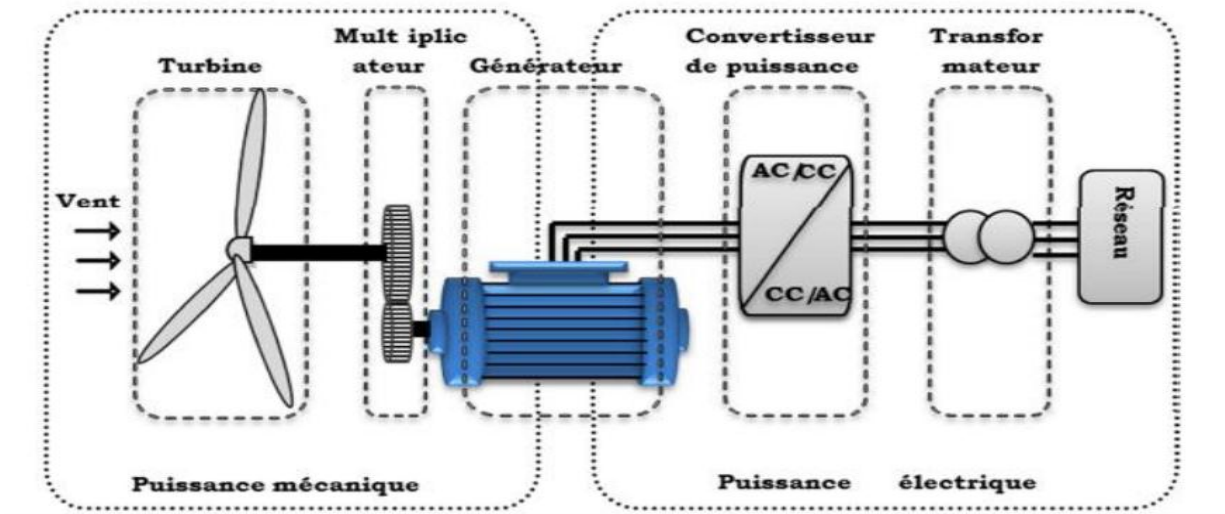
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

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 (1.1).



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 (1.2). [2]



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 [3].

I.2.2. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des 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)[4].

- ✓ **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I-2) : 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 [4].

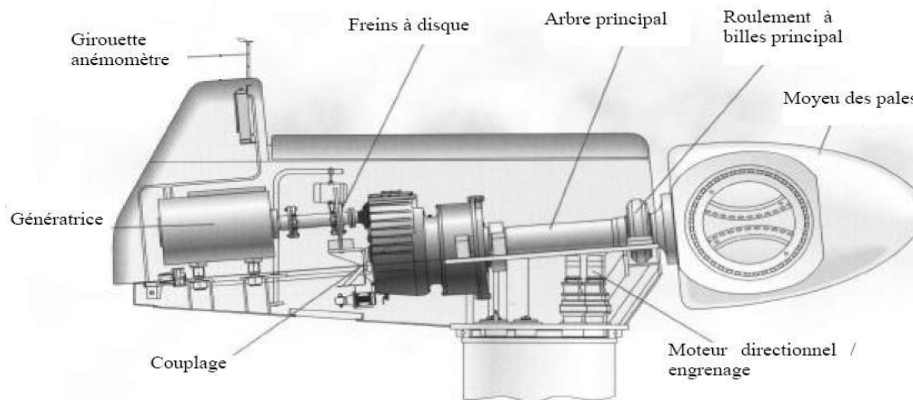


Figure (I-3): Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

- ✓ **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 [4].

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)[4].

I.3. 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.3.1. 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 [05].



Figure (I-4): Eolienne à axe vertical

I.3.2. 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 [06].



Figure (I-5): Eolienne à axe horizontal

I.4. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

I.4.1. Bilan des forces sur une pale

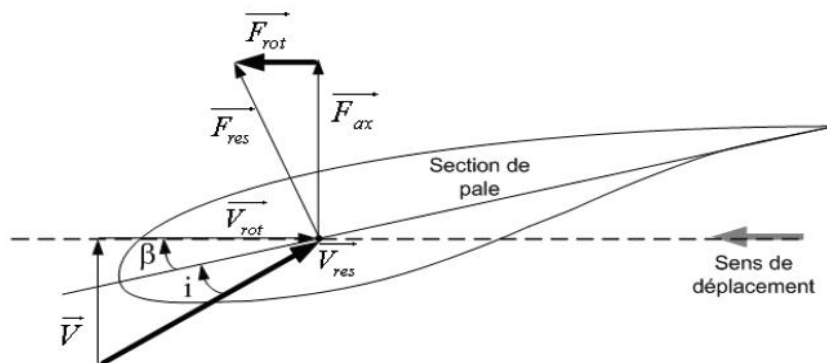


Figure (I-6): Bilan des forces sur une pale

La Figure (I.5) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [07]. 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.4.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

I.4.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"

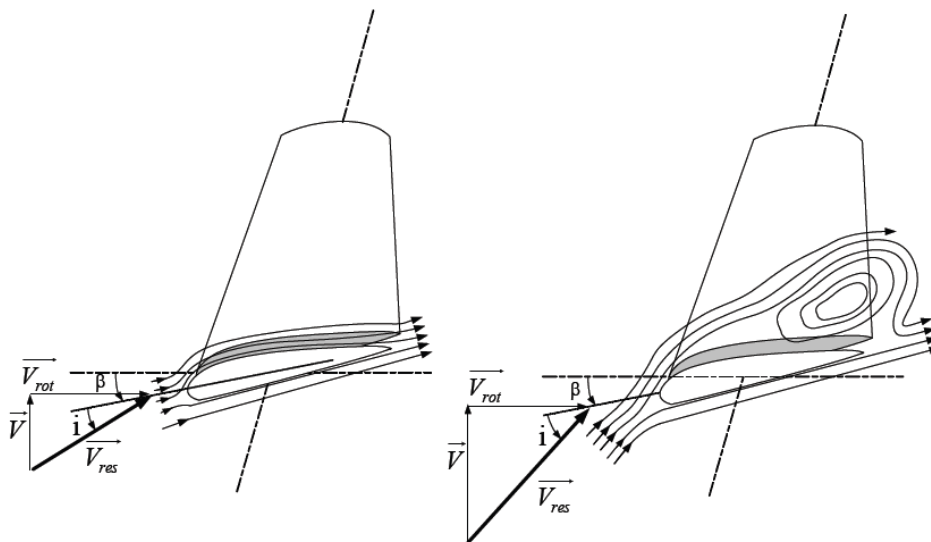


Figure (I-7): Flux d'air sur un profil de pale "stall"

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-6) 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 de décalage β 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 [08].

I.4.2.2. Système d'orientation des pales "pitch"

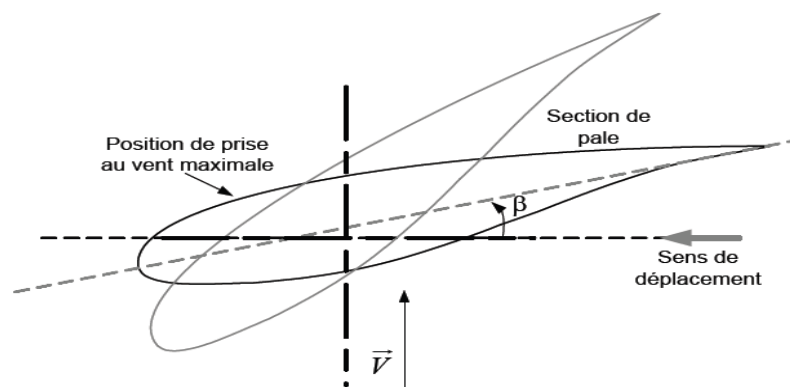


Figure (I-8): Variation de l'angle de calage d'une pale

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.5. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

I.5.1. 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.

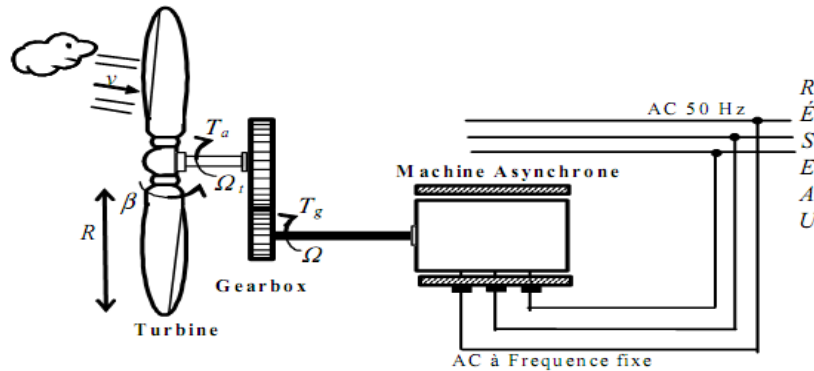


Figure (I-9): Aérogénérateur à vitesse fixe

✓ **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.5.2. 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) [09].

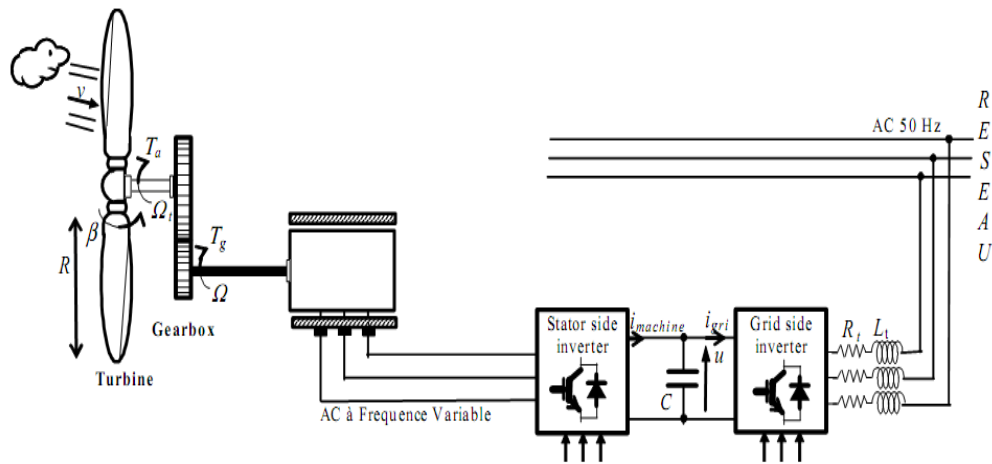


Figure (I-10): Aérogénérateur à vitesse variable

I.6. 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 (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.6.1. 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.

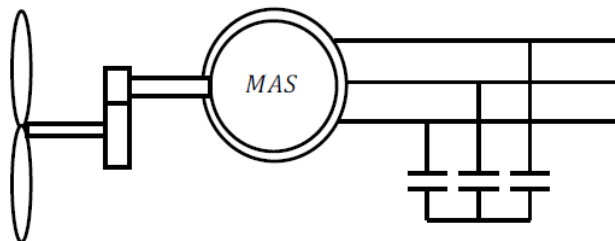


Figure (I-11): Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage

I.6.2. 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 [10].

I.6.2.1. 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 (figure I-11) [07].

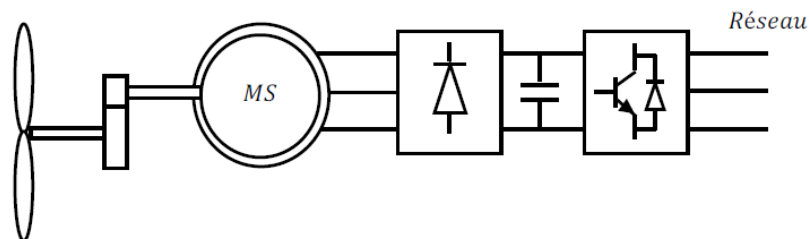


Figure (I-12): Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique

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 .6.2.2. 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 rotoriques 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 rotoriques et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé (figure I.12). Plus la pulsation rotorique est proche de la puls ationde synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.

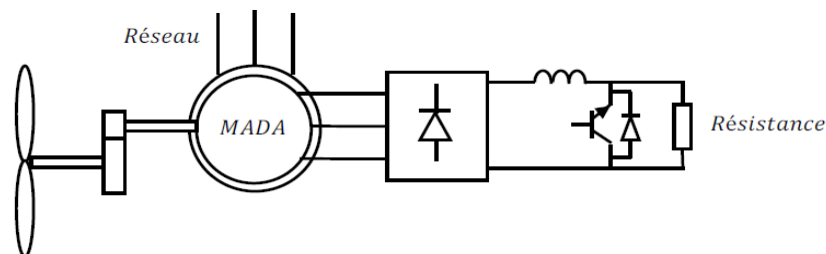


Figure (I-13): Contrôle de glissement par l'énergie dissipée

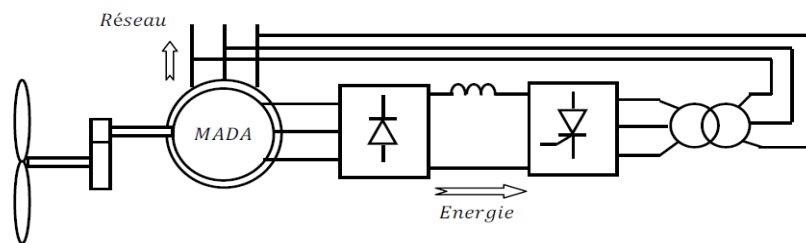
Vue la taille de la résistance (située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse avec un glissement maximum qui ne dépasse pas 10 %. L'inconvénient de ce principe c'est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion [11].

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 [12]. 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-13) [11]. 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-14) : 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-14). 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 [13].

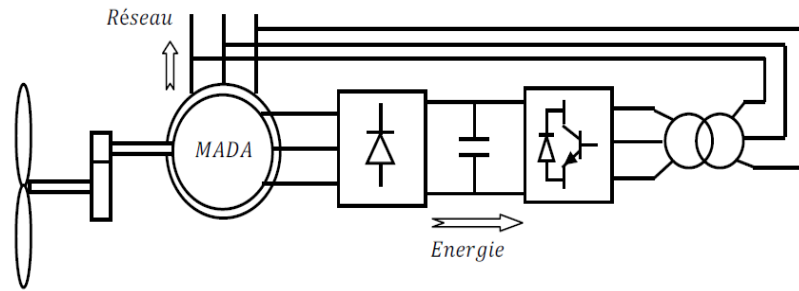


Figure (I-15): Structure avec deux ponts à diodes et à transistors

- **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 (figure I-15) [14].

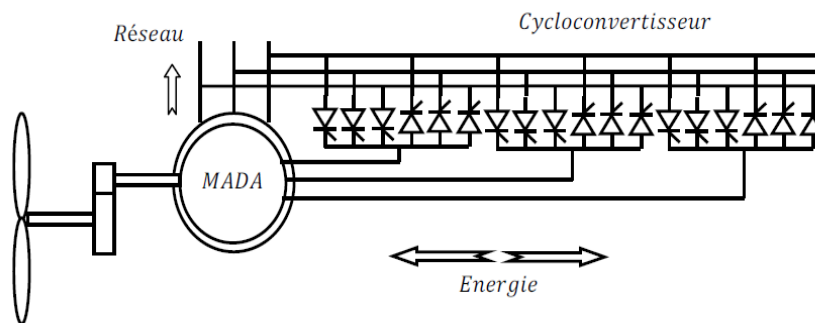


Figure (I-16): Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

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-16) 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.

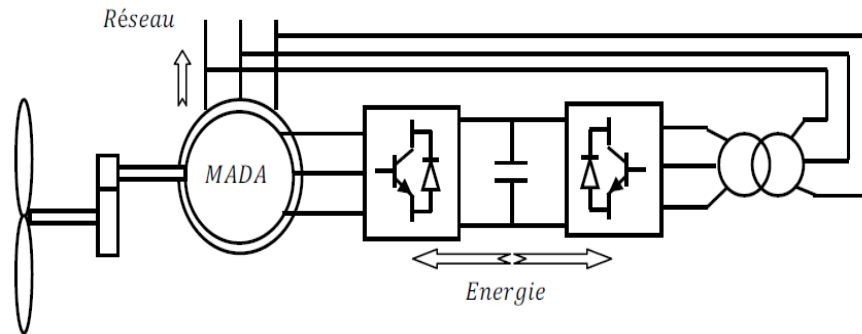


Figure (I-17) Structure avec convertisseurs à MLI

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.8. 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.8.1. 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 CO₂, ni d'autres gazes. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21

- milles tonnes de SO₂ et 17.5 milles tonnes de Noix. Ces émissions sont les responsables des pluies acides [10] ;
- Elle ne nécessite aucun carburant ;
 - L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risque 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.8.2. 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.9. 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.

*Modélisation et
commande
vectorielle de la
MADA*

II.1. Introduction

En générale dans les éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice qui peut fonctionner à vitesse variable.

Dans ce chapitre, nous allons 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. Description de la machine asynchrone à double alimentation

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative"[15]

II.3. Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'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 (figure II-1)[06].

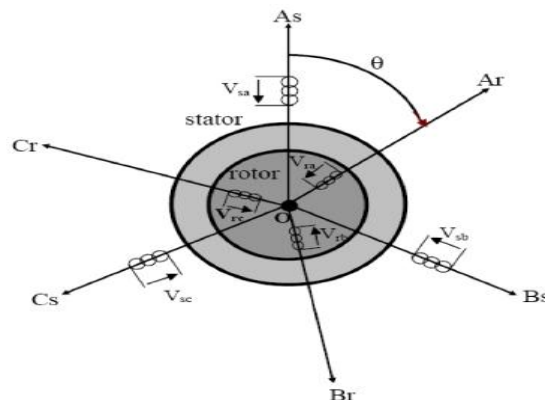


Figure (II-1): Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée

II.4. Modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse du Synchronisme pour être moteur et au-dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.

II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

II.4.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

II.4.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

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

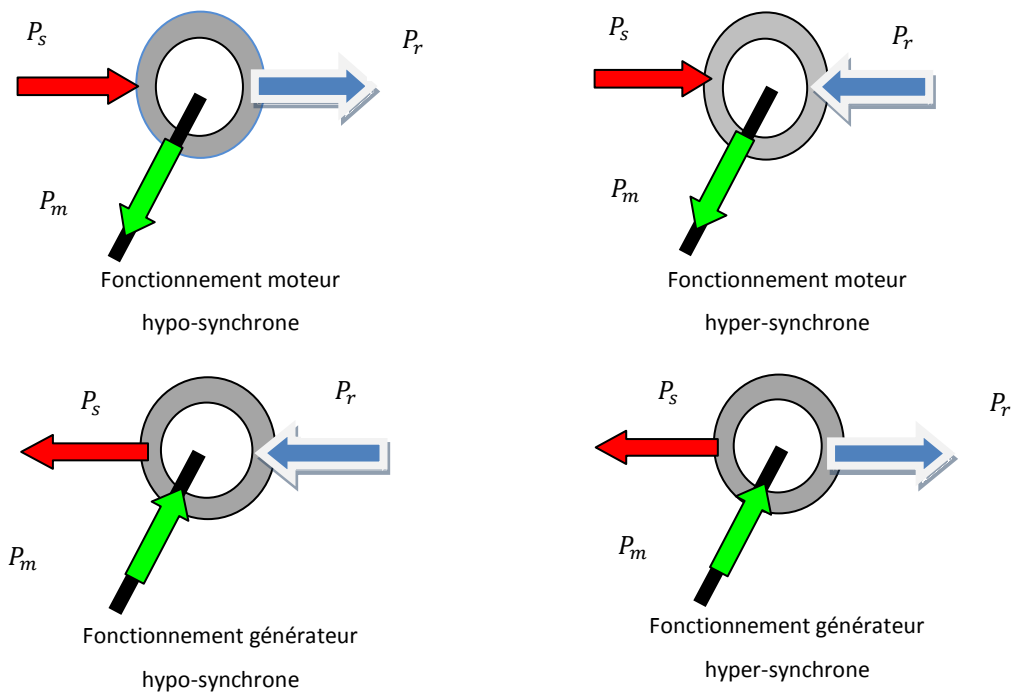


Figure (II-2): Modes opérationnels caractéristiques de la MADA

On peut donc remarquer que la MADA à deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [16].

II.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 ω_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 ω_{gl} telle que [11] :

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

Où : g est le glissement et ω_{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 [11].

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:

$$f_{ro} = fg \quad (II.2)$$

II.6. 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 [17]

- 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.7. l'application de la MADA dans les systèmes éoliens

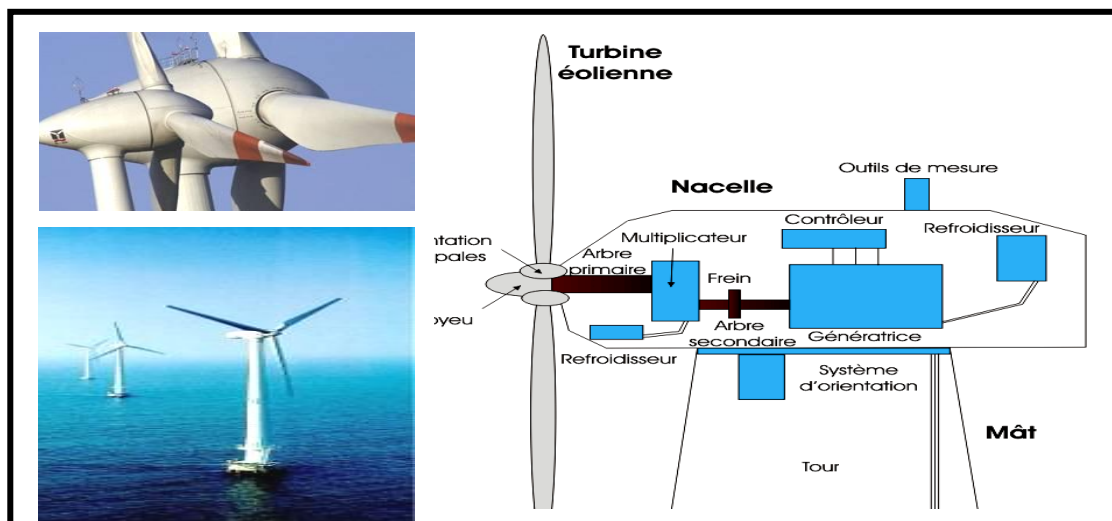


Figure (II-3): Eolienne installée en mer

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

Les turbines de vent sont 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, vue que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. Une synthèse bibliographique a mis en évidence l'abondante 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), figure(II-3). Les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la puissance rotorique qui représente environ de 20 à 30% de la puissance nominale. C'est le principal inconvénient de cette technique [18]

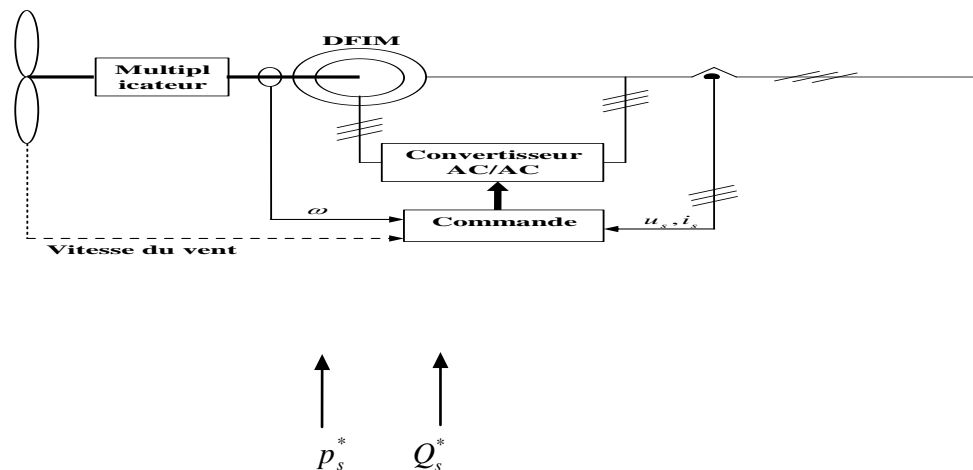


Figure (II-4) : Schéma de principe d'un aérogénérateur à base de la MADA

II.8. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [26].

II.8.1. 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'écuréuil 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.8.2. Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais .
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA

II.9. 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.9.1. 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 .
- 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-5) rappelle 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).

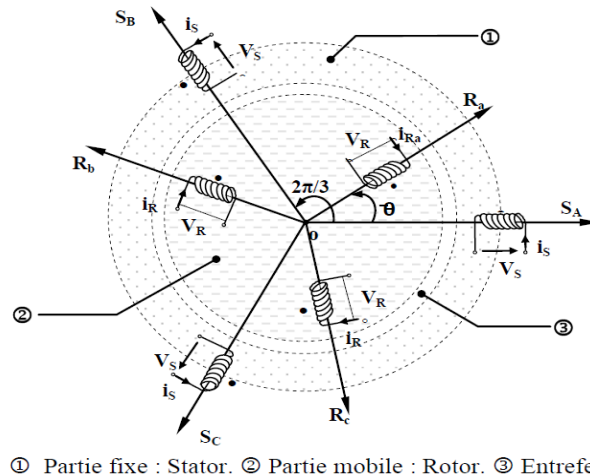


Figure (II-5) : Représentation simplifiée de la MADA

II.9.2. Modèle mathématique de la MADA

II.9.2.1. Equations électriques

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notion matricielle, par [19] :

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

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par [26]:

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

Où:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

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

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

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (\text{II.5})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \quad (\text{II.6})$$

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

Et

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (II.5) et (II.6) respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes:

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}[i_s] + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II.7})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d}{dt}([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II.8})$$

II.9.2. Equation mécanique

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

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f. \Omega \quad (\text{II.9})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.7) et (II.8). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.9.3. Modèle diphasé de la MADA

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocity des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II.6).

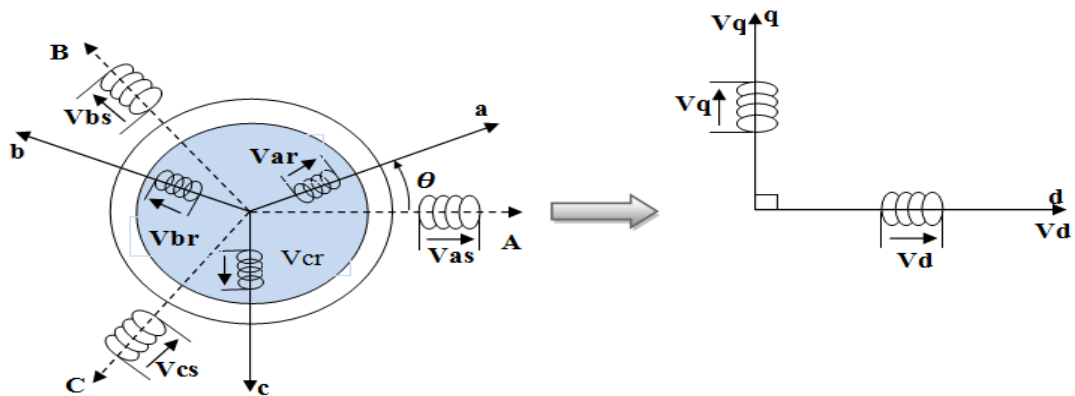


Figure (II-6): Modèle de PARK de la MADA

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 [20]:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

Il est noté par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques ((θ_r). rotoriques) (figure II.6).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s$$

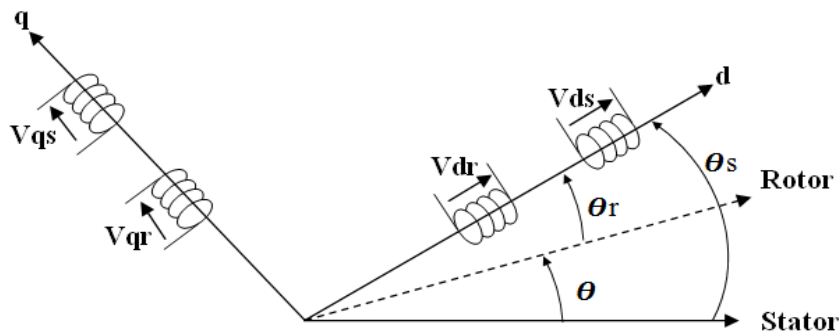


Figure (II-7): Représentation de la machine dans le repère diphasé

II.9.3.1. Equation des tensions

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

ω_s Pulsation du champ tournant d'axe (d, q)

ω_r Pulsation électrique du rotor

II.9.3.2. Equation des flux

L'équation des flux statorique et rotorique est donné comme suit:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{dq} = L_r I_{dr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

II.9.3.3. Equation du couple électromagnétique

Après qu'on effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimé sous différentes formes, on trouve celle-ci[20]:

$$C_e = p(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds}) \quad (\text{II. 13})$$

$$C_e = p. M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 14})$$

$$C_e = \frac{p. M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II. 15})$$

$$C_e = \frac{p. M}{L_s} (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 16})$$

II.10. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie électrique [21].

II.10.1. 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 d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone ϕ_s , ϕ_r au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple [22].

II.10.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique. Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Figure(II.8)

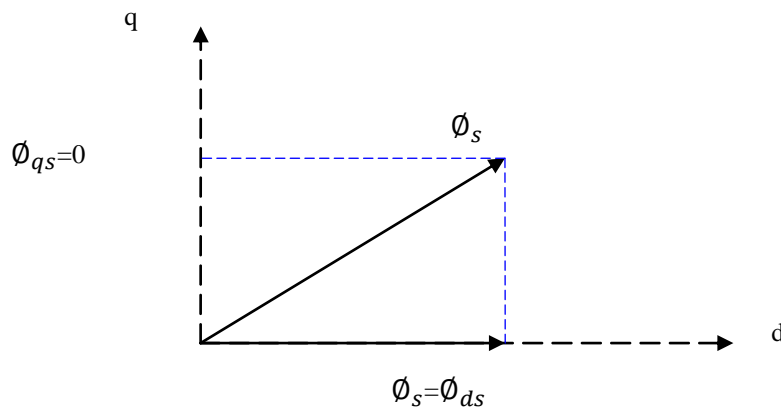


Figure (II-8): Orientation de flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rq} , i_{sq} , et deux courants contrôlés indirectement i_{qr} , i_{qs} .

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine

II.10.3. Commande vectorielle de la MADA

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

R_s étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [23], l'expression de la tension statorique devient alors:

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (\text{II. 17})$$

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:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors:

$$C_e = \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II.20})$$

II.10.3.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (II.19), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.10.3.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

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

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

De l'expression (II.18) nous pouvons écrire:

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{II.25})$$

D'où d'après (II.13)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{II.26})$$

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

II.10.3.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques

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

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

A partir des systèmes d'équations (II.24) et (II.28), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous

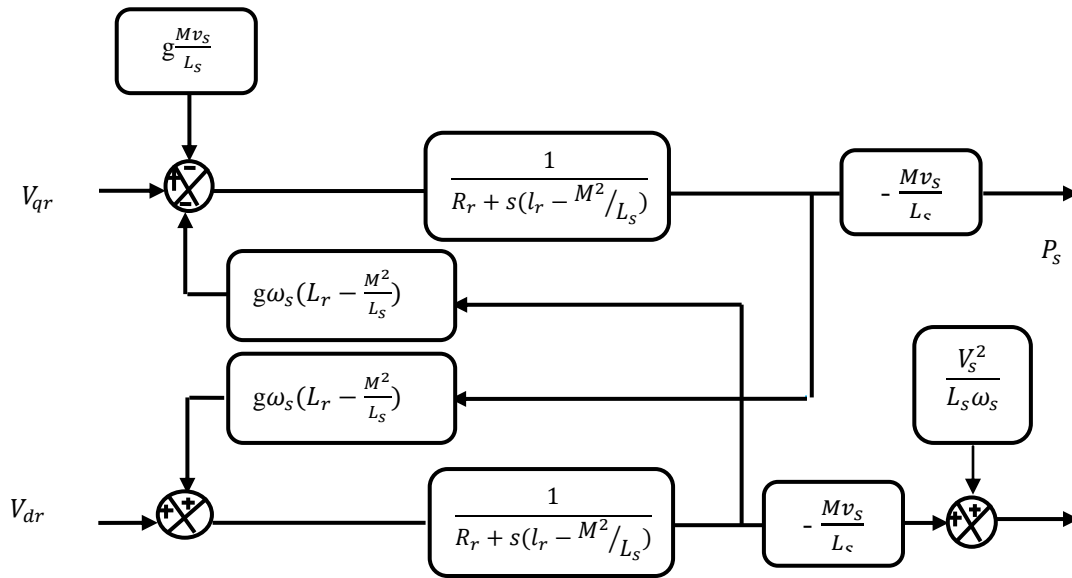


Figure (II-9): Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

II.10.4. contrôle indépendant des puissances active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser son bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

II.10.4 .1. Commande directe

Si l'on observe les équations (II.24), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.28) disparaissent en régime permanent [27]. Nous pouvons donc écrire :

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

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

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure II-10).

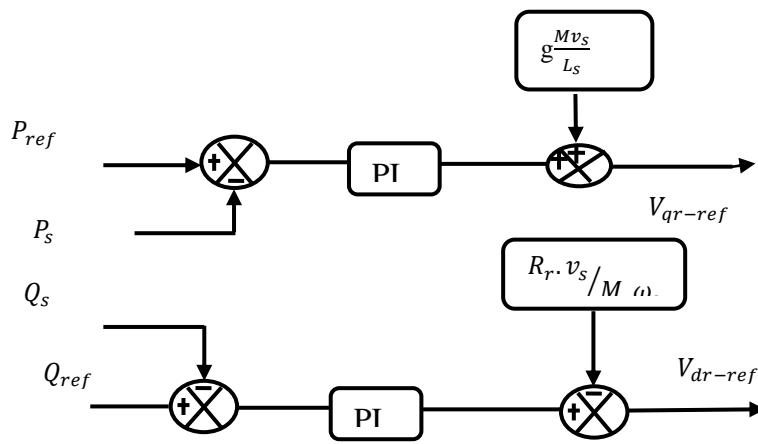


Figure (II-10): Schéma bloc de la commande directe

II.10.4.2. Commande indirecte

II.10.4.2.1. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rétorques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rétorques d'axe d et q .

A partir des expressions de la puissance active et réactive satiriques du système (II.24) on déduit les références des courants rétorques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} \\ I_{dr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s.M} \end{cases} \quad (II.30)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

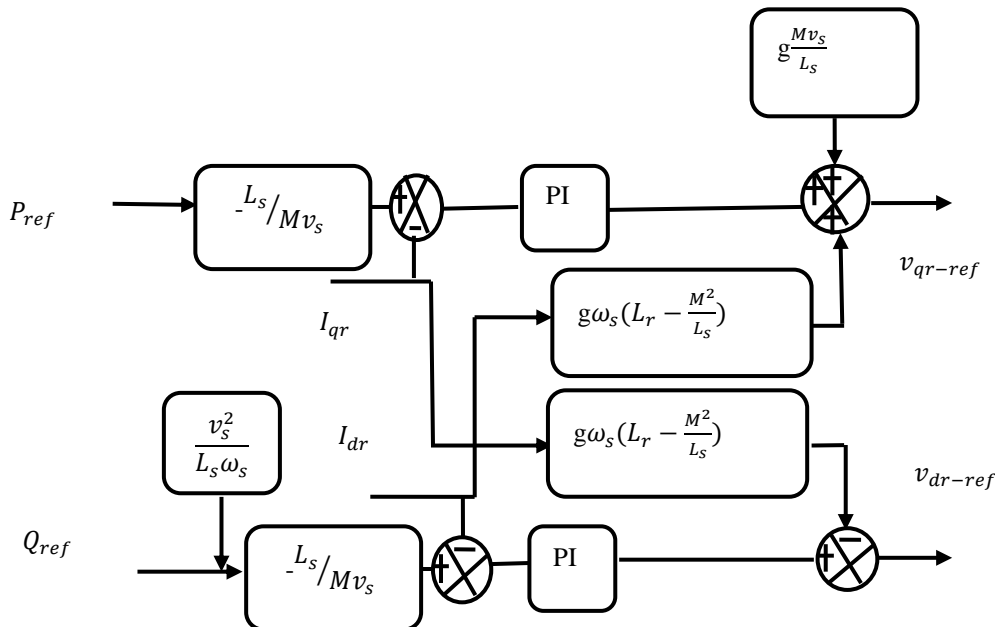


Figure (II-11): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle

II.10.4.2.2. Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante

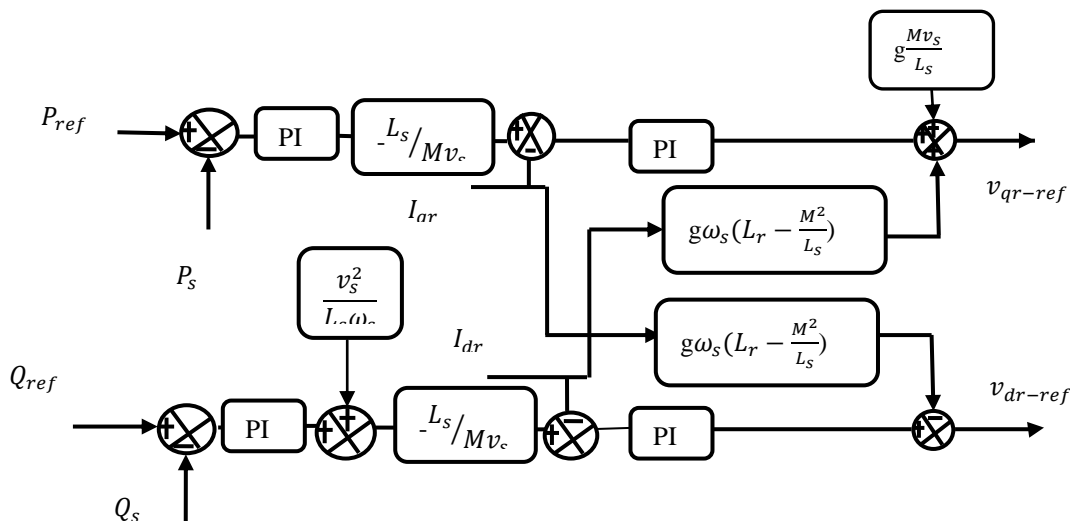


Figure (II-12): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

II.10.4.3. 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 oeuvre. Ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [24]. 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.10.5. Onduleur de tension à 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.13).

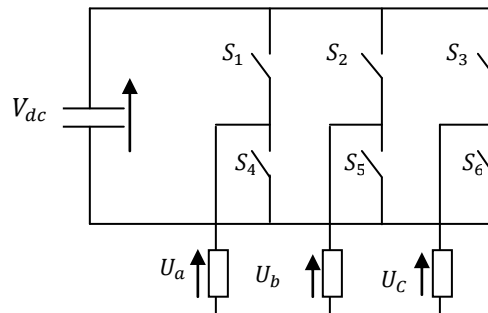


Figure (II-13): Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux

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 :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

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

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3} \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3} \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

II.10.5.1.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.14).

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 :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.34})$$

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):

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.35})$$

II.10.5.2. 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 [25]:

❖ Tape 1:

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

❖ Tape 2:

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

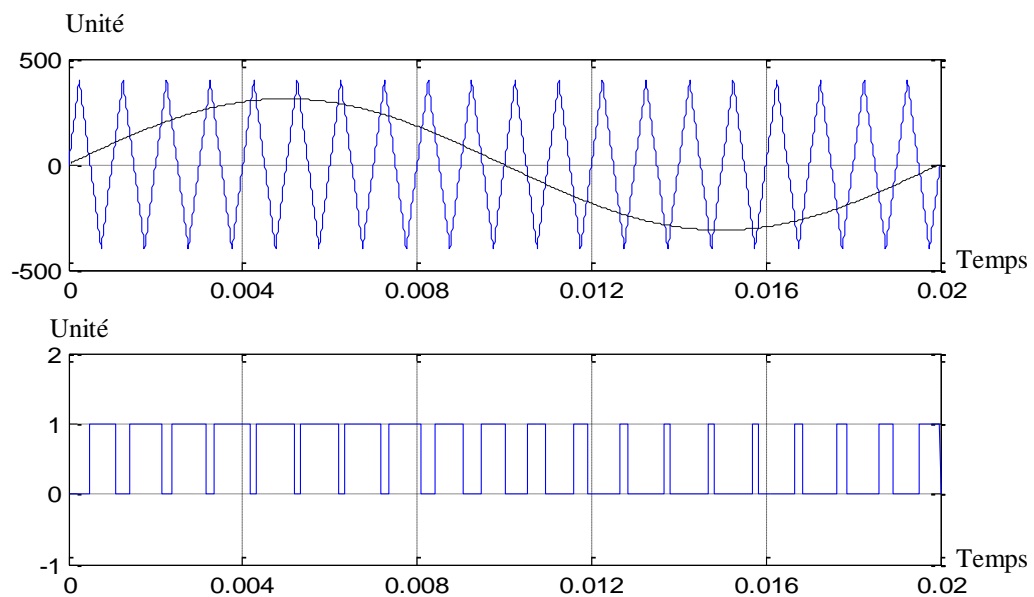


Figure (II-14): Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse

II.11. Simulation de la commande de la MADA

Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MATLAB-Simulink, à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir la machine, l'onduleur, la commande MLI, les régulateurs et divers composants nécessaires à la commande. Nous avons soumis le système à des échelons de référence afin d'étudier le comportement de la régulation des puissances active et réactive de la machine transmises au réseau.

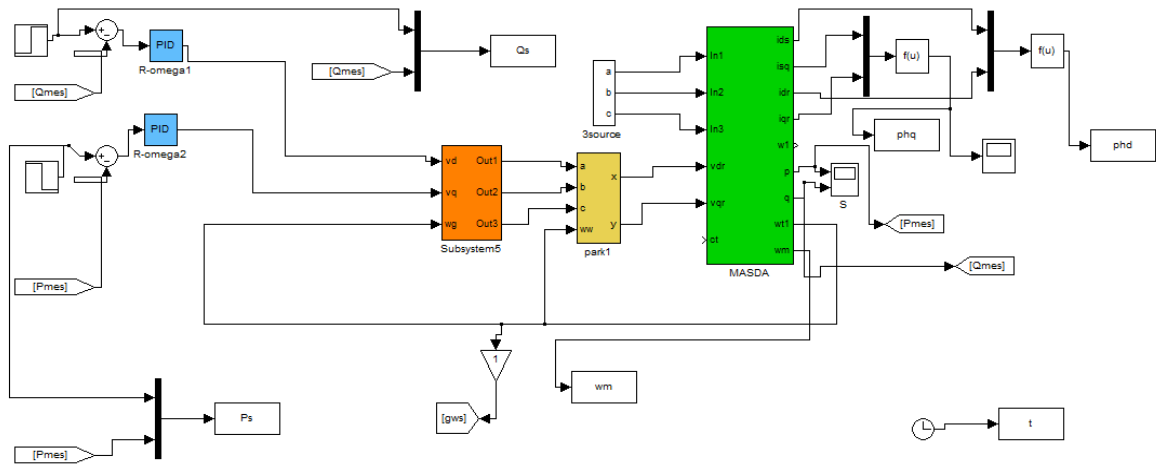


Figure (II-15): Schéma bloqué de la modèle de la commande vectorielle de GADA

Les résultats de simulation présenter sur les figure ci-dessous, nous permet de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulo-sinusoidal a vitesse de rotation fixé égale 50 rad/s , avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -2000W$ entre $t = 1s$ et $t = 3s$, et une puissance réactive a $t = 4s$.

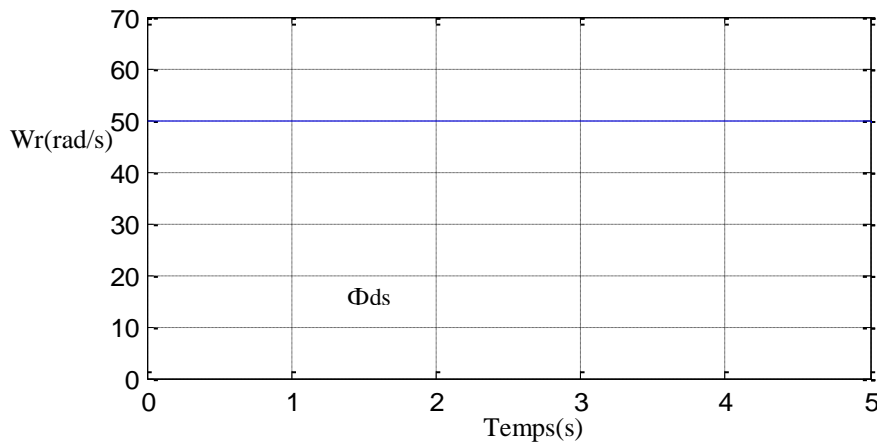


Figure (II-16): Vitesse de rotation de la MADA

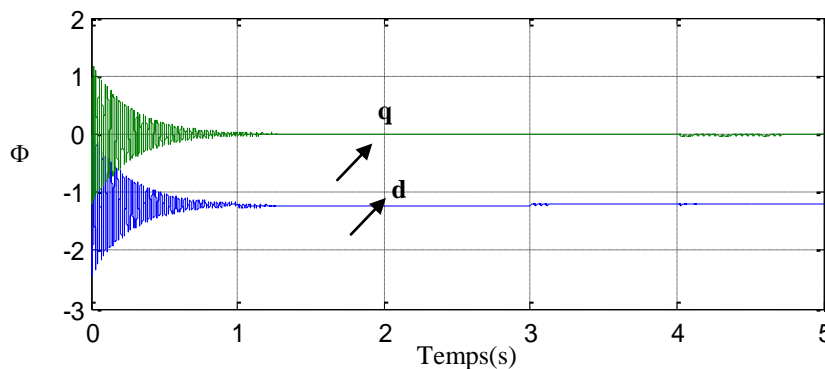


Figure (II-17) Flux statorique de la MADA

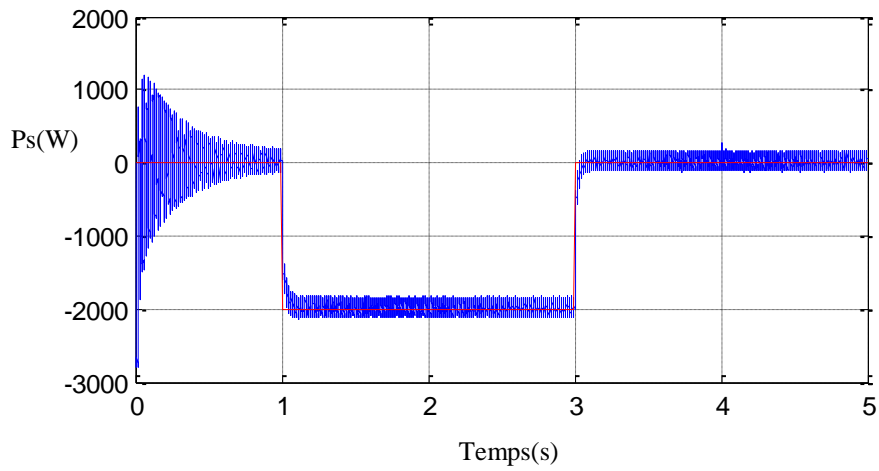


Figure (II-18): Puissance active de la MADA

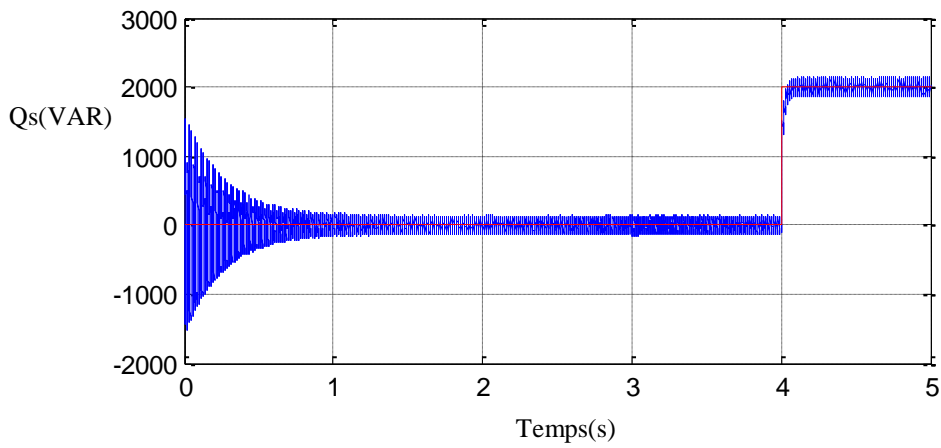


Figure (II-19): Puissance réactive de la MADA

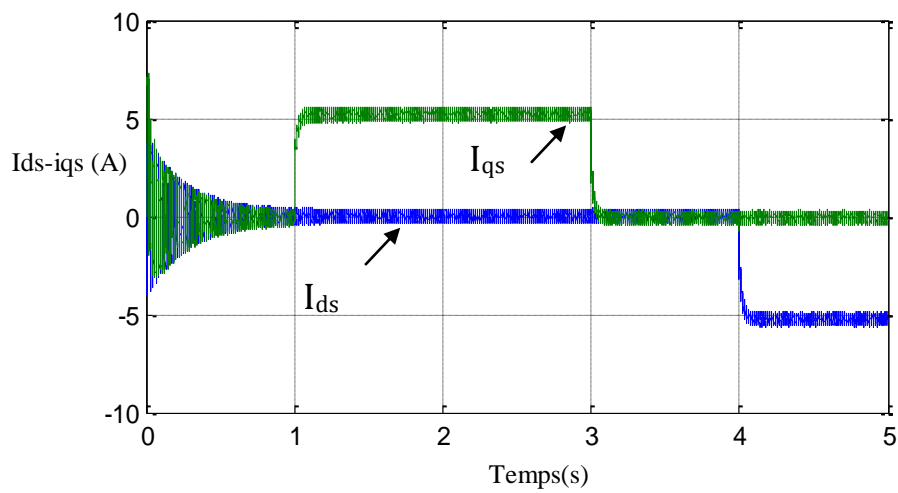


Figure (II-20): Courant statorique Iqs- Ids de la MADA

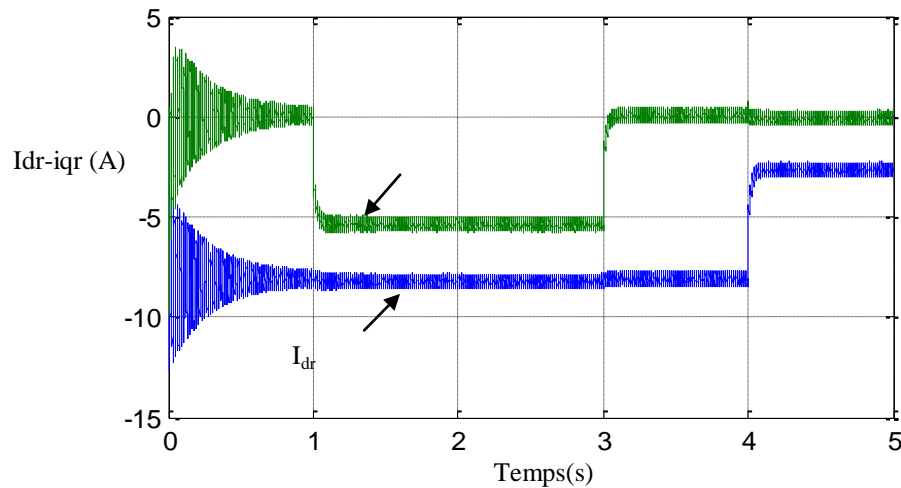


Figure (II-21) : Courant rotorique Iqr- Idr de la MADA

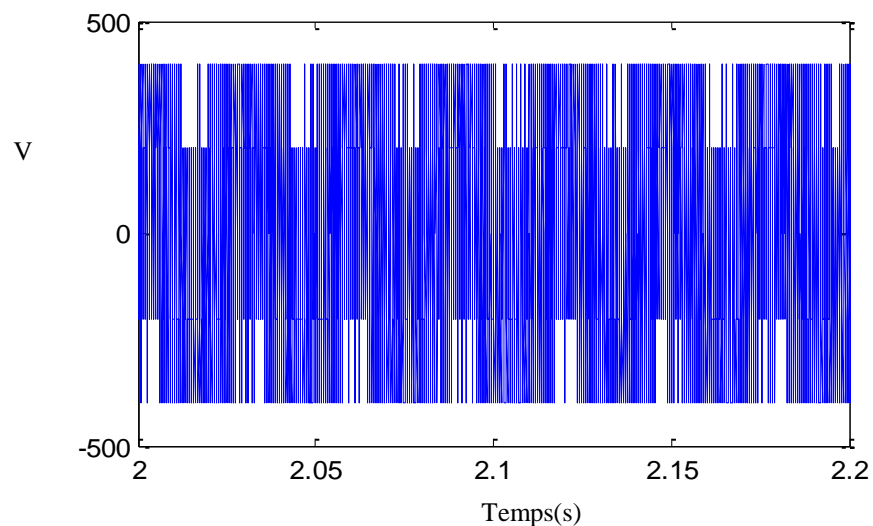


Figure (II-22): Tension aux bornes de l'onduleur de la MADA

Les figures (II-21) et (II-23) montrent les variations des différentes grandeurs lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations. la tension obtenue à la sortie de l'onduleur à MLI fait apparaître clairement deux seuils correspondant à $1/3$ et $2/3$ de $500V$ valeur de la tension du bus continu .

Les résultats de simulation montrent que toutes les grandeurs similaires. Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté.

II.12. Interprétations des Résultats

Ces résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant

rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle, à l'instante $t=[0 \ 4]$ c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le modèle mathématique de la MADA basée sur les transformation de Park et quelques hypothèses simplificatrices. Ensuite, on a établi la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. D'autre part, la commande indirecte ont été détaillés en utilisant les régulateurs proportionnels intégral, avec boucle de puissance, qui tiens compte du couplage entre les axes et utilise les termes de compensation pour le corriger. Enfin, nous avons examiné la commande dans l'environnement MATLAB/Simulink pour évaluer les performances et la robustes.

*Commande du
système éolien à
vitesse variable
basé sur MADA*

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

III.2. Modèle de la chaîne de conversion

III.2.1. 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 sur la figure (III-1) 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 [11].

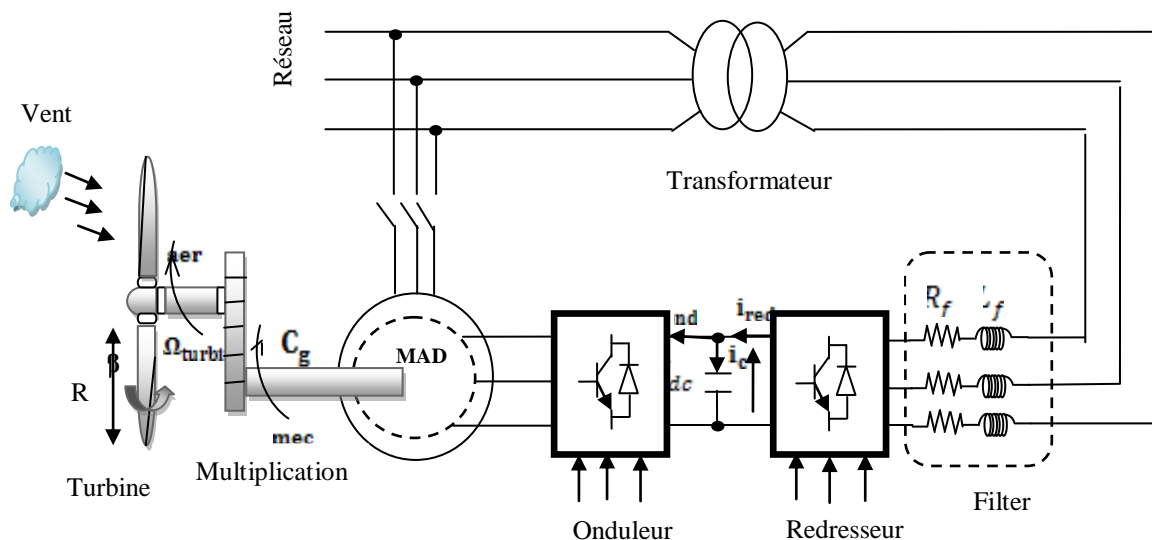


Figure (III-1): Modèle de la chaîne de conversion éolienne

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.2.2. 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 êtres sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées [11].

III.2.2.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est à deux niveau, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que [27] :

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

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 2})$$

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

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - idg \quad (\text{III. 3})$$

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

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s L i_{qr} \\ V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_s L i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

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

$$\begin{cases} h_d = e_d - \omega_s L i_{qr} - V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ h_q = e_q + \omega_s L i_{dr} - V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

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, θ_g est égale à la phase du réseau.

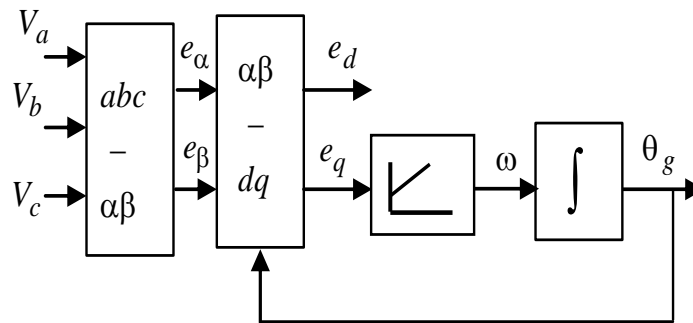


Figure (III-2): Structure classique d'une PLL triphasée

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure (III-3)

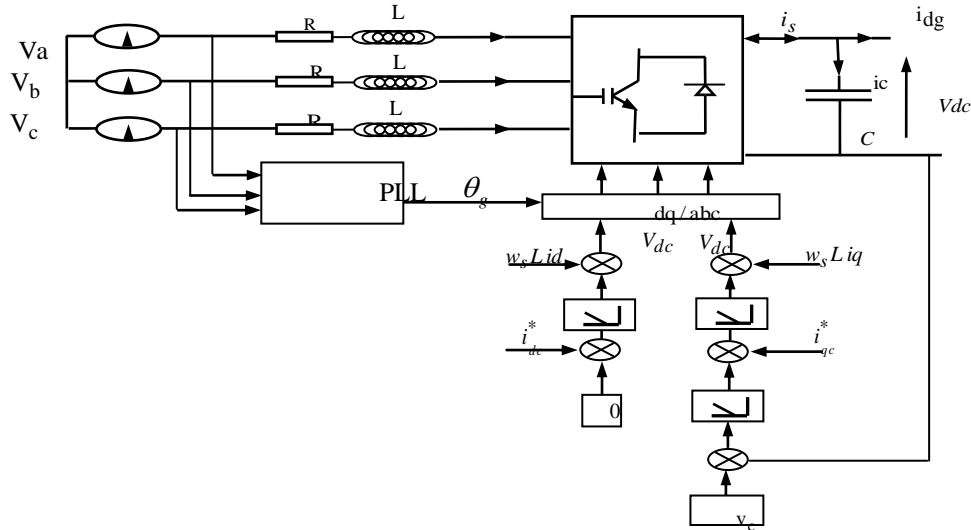


Figure (III-3): Structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée

III.2.2.2. 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 [28].

III.3. 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 [15].

III.3.1. 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 [15].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res-d}(s)}{V_{res-d} - V_{red-d}} = \frac{I_{res-q}(s)}{V_{res} - V_{red-d}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III.6)$$

III.4. Modélisation de la turbine

III.4.1. 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.4.1.1. La surface balayée par le rotor

La surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 600 KW est de quelque 1.500 m², 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.4.1.2. 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. Ou autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

À 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 [29] .

III.4.1.3. 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.4.1.4 Puissance récupérable par une turbine

La turbine qui comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (III-6) 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 :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III. 7})$$

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 :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III. 8})$$

Avec:

ρ : 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_{ent} : est la vitesse du vent en (m/s).

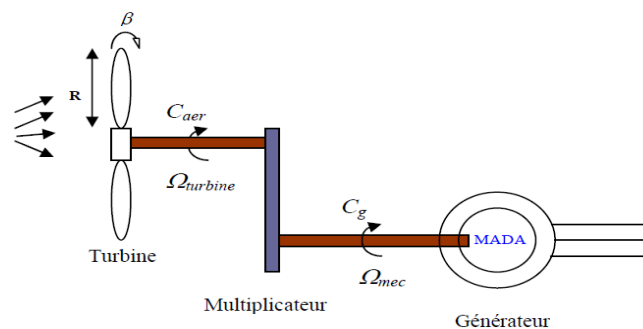


Figure (III-4): Schéma d'une turbine éolienne

D'après la relation (III.21) 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 [09], [30], [19], La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) (\rho S v^3) \quad (III. 9)$$

C_p : coefficient de puissance défini comme suit :

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

β : angle d'orientation des pales.

λ : est le ratio de vitesse défini comme:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III. 11)$$

Avec:

R: Longueur de pales

Ω_t : Vitesse de la turbine.

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

Le couple aérodynamique est donné par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 12)$$

III.4.1.5. 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 $0,59$ [22] [31]. 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 λ .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (III-5).

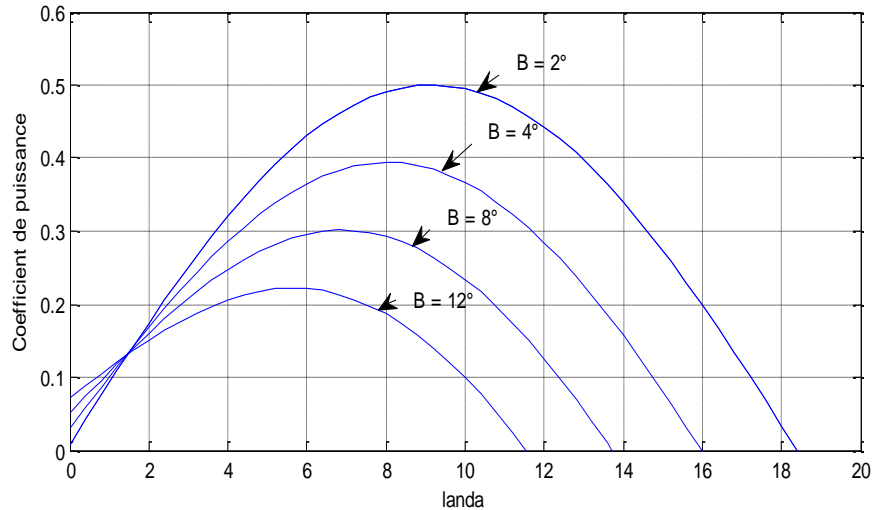


Figure (III-5): Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

III.4.1.6. 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 [09].

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.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III. 13)$$

Avec:

C_g : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 14)$$

III.4.1.7. Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [22] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (III. 15)$$

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_{vis} ;

Et le couple issu du multiplicateur C_g

III.4.2. 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 (Figure III-6).

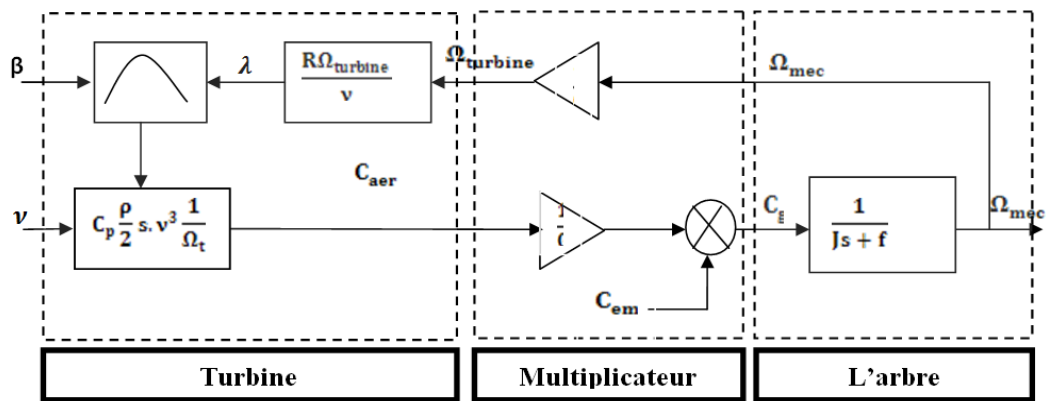


Figure (III-6): Schéma bloc du modèle de la turbine

III.5. Stratégie de commande de la turbine

Comme il est illustré sur la figure (III-7), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [22].

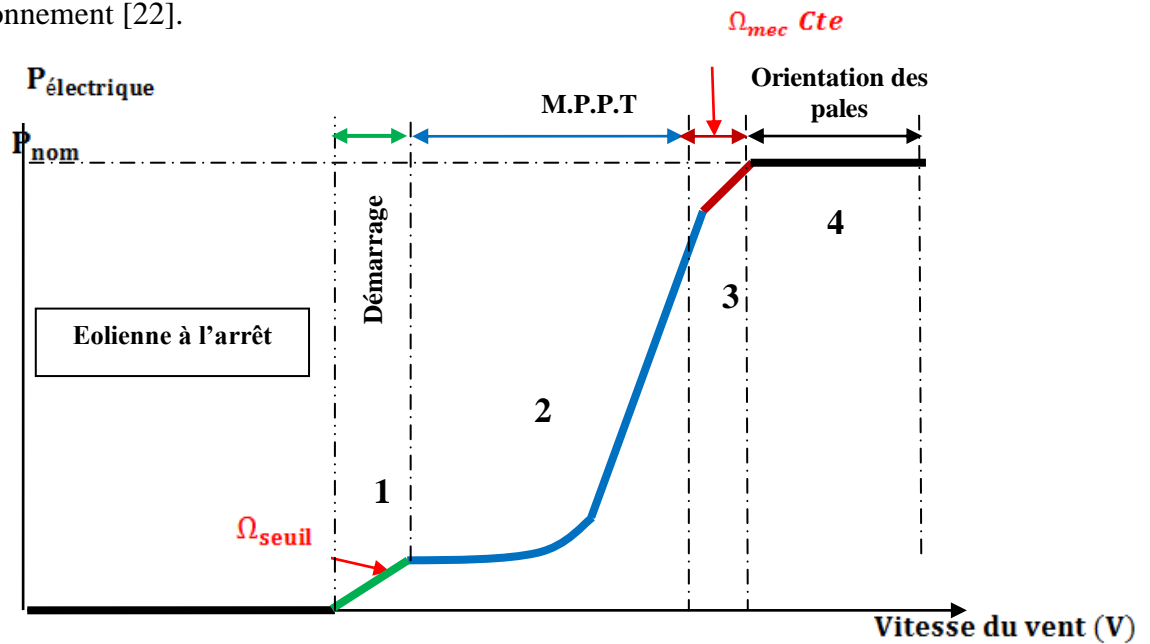


Figure (III-7): Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

- **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 la quelle 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_{nom} .
- **Zone4 :** Arrivée à la puissance nominale P_{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.6. Système de la chaîne globale

La structure globale du la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présenté sur la figure(III.8) [09] :

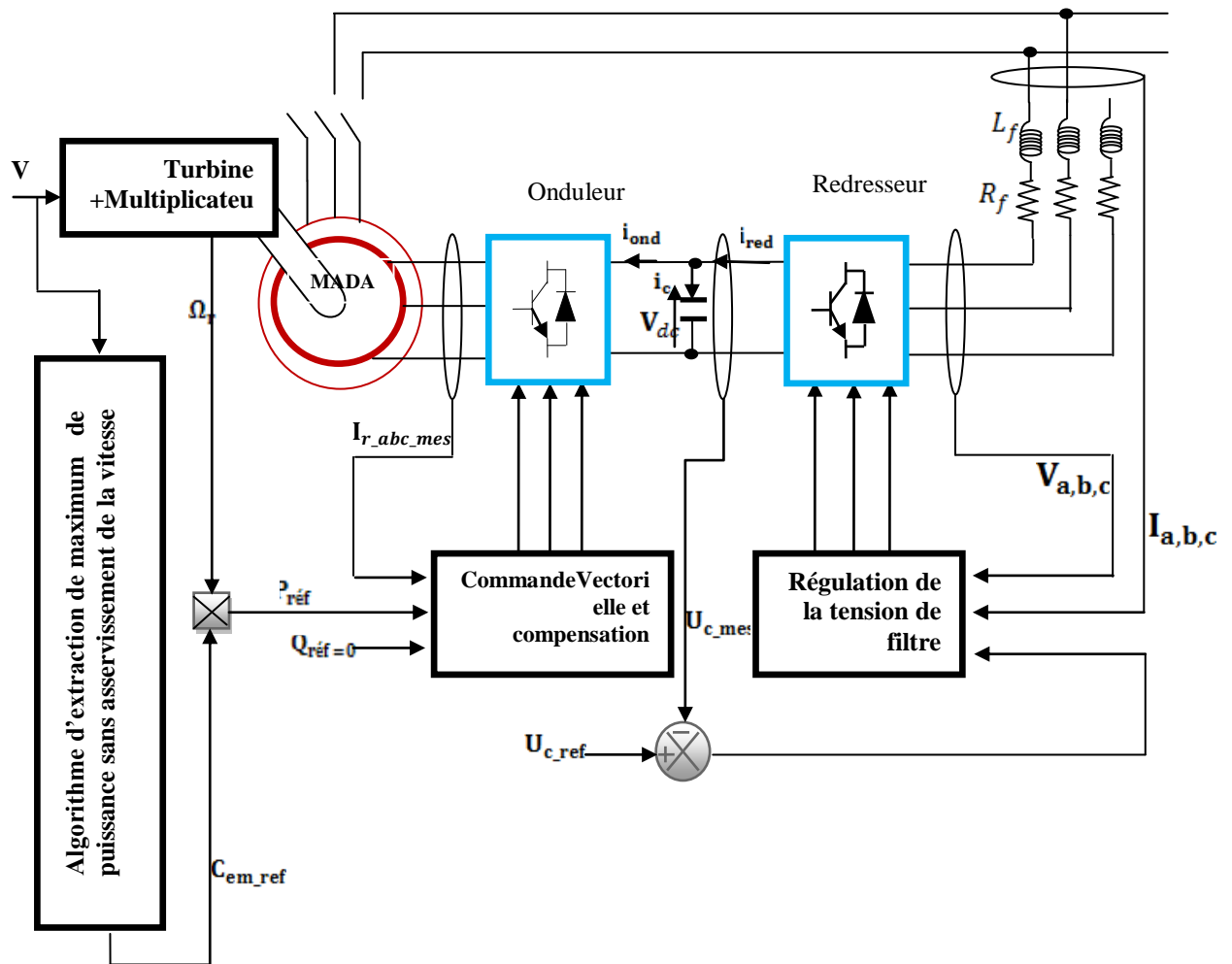
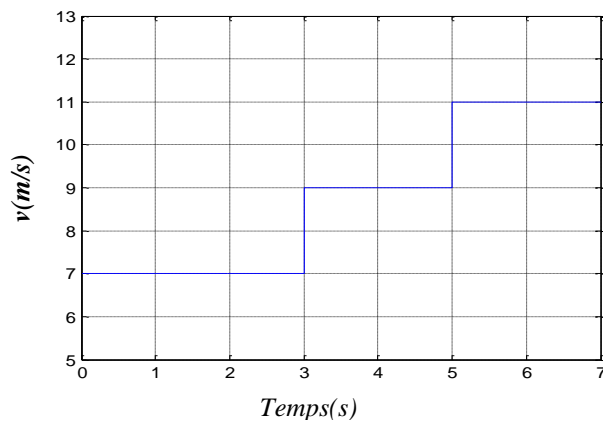


Figure (III-8): Structure de la chaîne globale

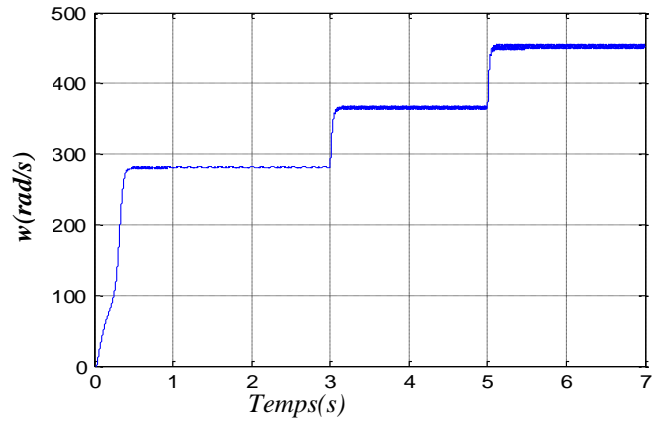
III.7. Résultats de simulation

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

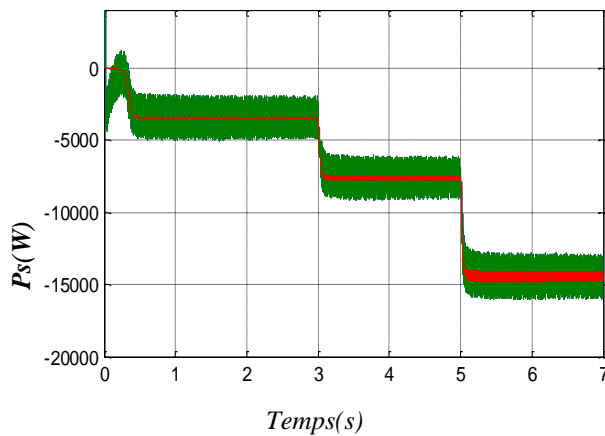
réactive de référence Q_s est fixée à 0. Nous montrons que les différentes puissances mises en jeu peuvent être contrôlées indépendamment



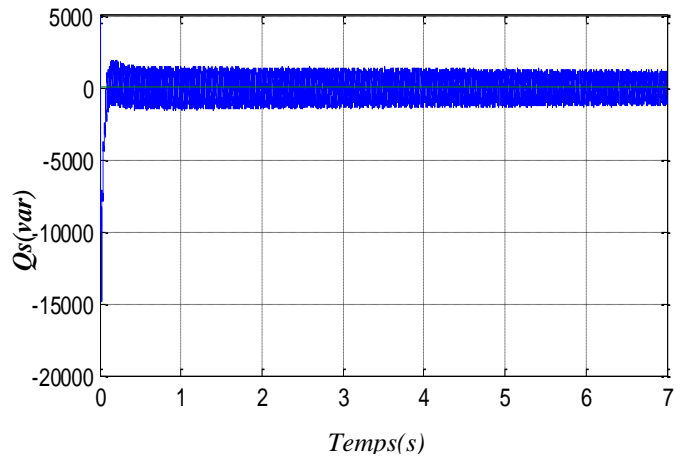
a. Vitesse du vent



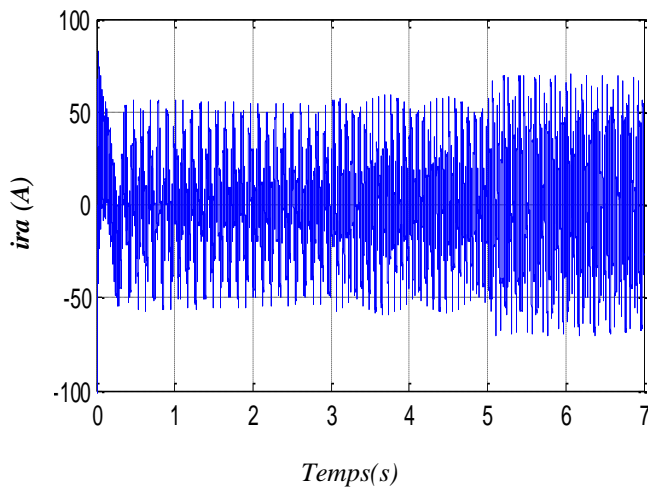
b. Vitesse de rotation



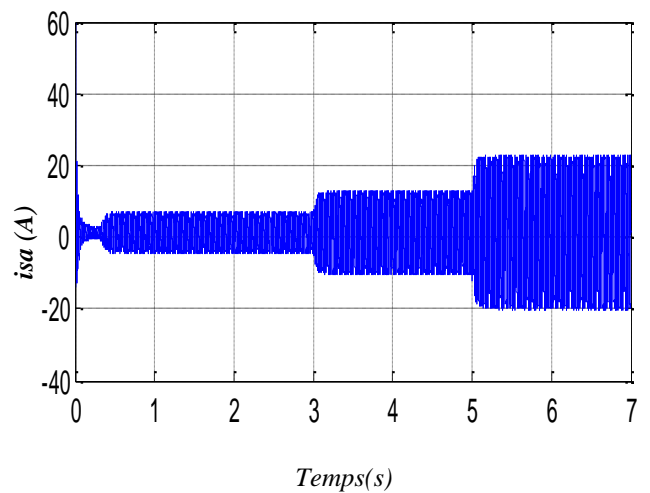
d. Puissance active satirique et sa référence



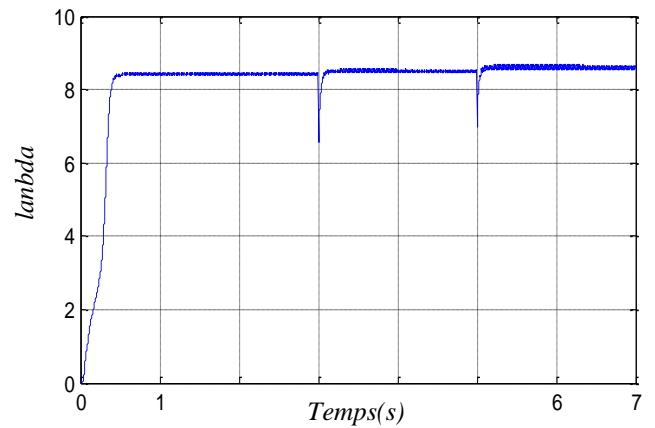
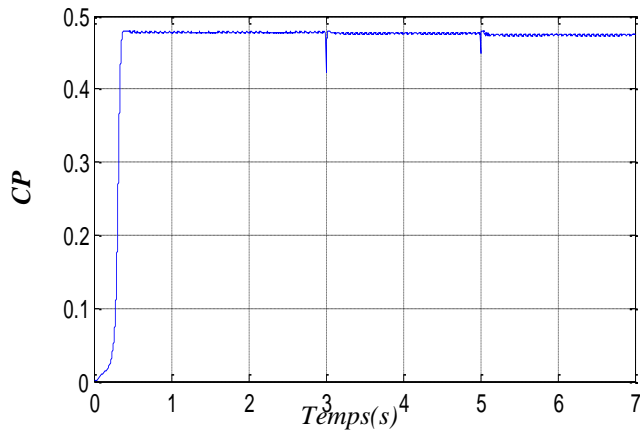
d. Puissance réactive satirique et sa référence



e. Courant rotoriqued'une phase

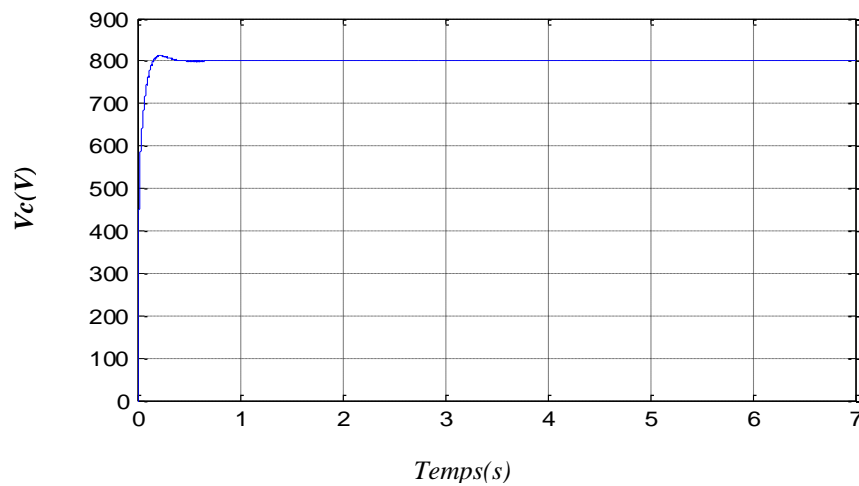


f. Courant statoriqued'une phase

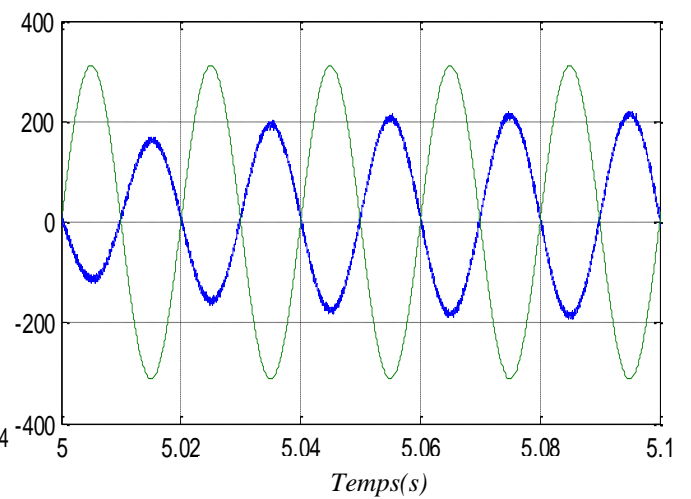
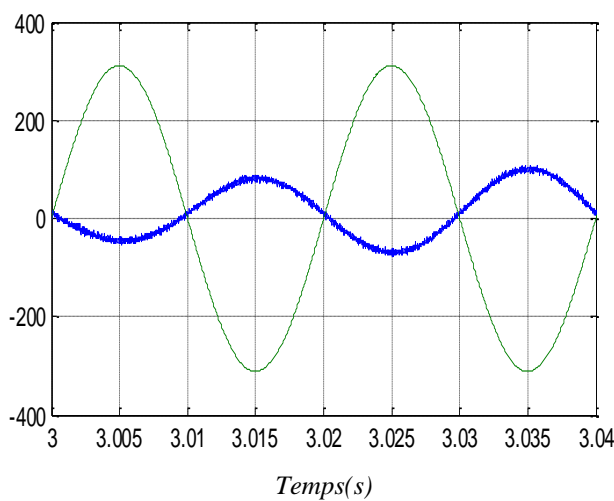


g. Coefficient de puissance de la turbine

h. Vitesse relative de l'éolienne



i-tension bus continue



Zoom sur le courant statorique et la tension réseau

Figure (III-9) : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

III.8. Interprétations des Résultats

Les figures ci-dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statoriques et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statoriques.

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.

Le courant statorique fourni par la DFIG est en opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la DFIG n'injecte que la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref}=0$).

Nous constatons que durant le régime de fonctionnement, le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau, cela signifie que la DFIG absorbe une puissance active du réseau.

On remarque que la tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse.

L'analyse spectrale du courant montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné en premier lieu le modèle de la chaîne étudiée, est on a traité l'alimentation de rotor qui est fournie par deux convertisseur MLI à deux niveaux (onduleur à deux niveaux et redresseur à deux niveaux).

La modélisation et l'application du redresseur à MLI, nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. Et par la suite, on a modélisé la turbine éolienne, où on a défini aussi les quatre zones de fonctionnement d'une éolienne en général. En dernier lieu, nous avons associés les différentes parties étudiées (Turbine, MADA, et les deux convertisseurs de puissance) qui présente un système éolien global.

*Commande sans
capteur de la
GADA intégré
dans un système
éolienne*

IV.1. Introduction

Un observateur est un système dynamique que l'on peut appeler capteur informatique qui à partir de l'entrée du système (la commande), et de la sortie mesurée, ainsi que une connaissance du modèle, fournira en sortie un état estimé qui devra tendre vers l'état réel.

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 d'observateur adaptative mode glissant.

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 [32].

- **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 satiriques mesurés et des flux rotoriques (courants magnétisants) estimés du moteur.

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

Le Système Adaptatif à Modèle de Référence est basé 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 [17].

- **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[20].

- **Observateurs déterministes**

Dans la pratique, l'observateur déterministe prend deux formes différentes, observateur d'ordre réduit où 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 assurée éventuellement 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) [28], 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 statorique, flux rotoriques 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 des 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 [31]. 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 [36], [24], [31]. 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 par observateur adaptative mode glissant

L'équation de l'observateur de la machine asynchrone doublement alimentée peut être exprimée dans la référence d-q par [14] :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases}$$

Avec $U = \{U_{ds} \quad U_{qs} \quad U_{dr} \quad U_{qr}\}$

$$X = \{I_{ds} \quad I_{qs} \quad I_{dr} \quad I_{qr}\}$$

En plus :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{R_s}{\partial L_s} & \omega_A + \frac{M^2}{\partial L_s L_r} p \omega_m & \frac{L_s R_r}{\partial L_s L_r} & p \omega_m \frac{M}{\partial L_s} \\ -(\omega_A + \frac{M^2}{\partial L_s L_r} p \omega_m) & -\frac{R_s}{\partial L_s} & p \omega_m \frac{M}{\partial L_s} & \frac{L_s R_r}{\partial L_s L_r} \\ \frac{L_s R_r}{\partial L_s L_r} & p \omega_m \frac{M}{\partial L_s} & -\frac{R_s}{\partial L_s} & \omega_A - \frac{M^2}{\partial L_s L_r} p \omega_m \\ p \omega_m \frac{M}{\partial L_s} & \frac{L_s R_r}{\partial L_s L_r} & -\omega_A + \frac{M^2}{\partial L_s L_r} p \omega_m & -\frac{R_s}{\partial L_s} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{\partial L_s} & 0 & -\frac{M}{\partial L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\partial L_s} & 0 & -\frac{M}{\partial L_s L_r} \\ -\frac{M}{\partial L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\partial L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\partial L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\partial L_s} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

L'observateur par mode glissant peut s'écrire

$$\dot{\hat{X}} = A \hat{X} + BU + G \cdot \text{sign}(S)(Y - C \hat{X}) \quad (\text{IV.1})$$

G:est la matrice de gain

L'observateur peut s'écrire

$$\dot{\hat{X}} = \left(\hat{A} - G \cdot \text{sign}(S) C \right) \hat{X} + BU + G \cdot \text{sign}(S) Y \quad (\text{IV.2})$$

Pour assurer la stabilité de l'observateur, il faut que les valeurs propres de la matrice $AL = (A - GC)$, Doit être stable.

Donc, toutes les valeurs propres d'AL devraient avoir des parties réelles négatives.

Les pôles peuvent être placés en résolvant l'équation différentielle, le gain de matrice G peut être calculé par la fonction (PLACE) Technique de placement de pôle dans MATLAB.

A .Le mécanisme d'adaptation de la vitesse

Le mécanisme d'adaptation de la vitesse sera déduit par la théorie de Lyapunov. L'erreur d'estimation sur les courants, qui n'est autre que la différence entre l'observateur et le modèle du GADA, est donnée par :

$$E = (A - GC)E + \Delta A \hat{X} \quad (IV.3)$$

Où

$$\begin{aligned} \Delta A &= (A - \hat{A}) \\ \Delta \omega_r &= (\omega_r - \hat{\omega}_r) \end{aligned} \quad (IV.4)$$

$$\Delta A = \Delta \omega_r \left\{ \begin{array}{cccc} 0 & \frac{M * M}{(seg * L_s * L_r)} & 0 & \frac{M}{(seg * L_s)} \\ -\frac{M * M}{(seg * L_s * L_r)} & 0 & -\frac{M}{(seg * L_s)} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{(seg * L_r)} & 0 & -\frac{1}{seg} \\ \frac{M}{(seg * L_r)} & 0 & \frac{1}{seg} & 0 \end{array} \right\}$$

Maintenant, considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = E^T E + \frac{1}{KL} \Delta \omega_r^2 \quad (IV.5)$$

Où:

$$E = \begin{Bmatrix} I_{ds} & -I_{ds} \\ I_{qs} & -I_{qs} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

$k\omega_r$: est une constante positive, en supposant que

$$\Delta \omega_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$$

L'application de la loi de général du mécanisme d'adaptation

$$\hat{\omega}_r = K \int E^T \Delta A \hat{X} dt \quad (IV.6)$$

Où

$$\hat{\omega}_r = k \int e_d \left(\frac{M^2}{\partial L_s L_r} \hat{i}_{sq} + \frac{M}{\partial L_s} \hat{i}_{rq} \right) - e_q \left(\frac{M^2}{\partial L_s L_r} \hat{i}_{sd} + \frac{M}{\partial L_s} \hat{i}_{rd} \right) dt \quad (IV.7)$$

Ce qui signifie

$$\hat{\omega}_r = k \int \frac{M^2}{\partial L_s L_r} (e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) + \frac{M}{\partial L_s} (e_q \hat{i}_{rd} - e_d \hat{i}_{rq}) dt \tag{IV.8}$$

Nous pouvons négliger les valeurs de la deuxième terme parce que ses faibles valeurs comparées par le premier terme , le mécanisme d'adaptation devient:

$$\hat{\omega}_r = k \int (e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) dt \tag{IV.9}$$

Avec:

k : est une constante positive, $e_q = \hat{i}_{rq} - i_{rq}$, $e_d = \hat{i}_{rd} - i_{rd}$

Afin d'améliorer la réponse de l'algorithme d'adaptation. On estimé la vitesse par un régulateur PI décrit par cette relation :

$$\hat{\omega}_r = Kp(e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) + Ki \int (e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) dt \tag{IV.10}$$

La structure générale de l'observateur de mode glissant est donné par la figure suivant :

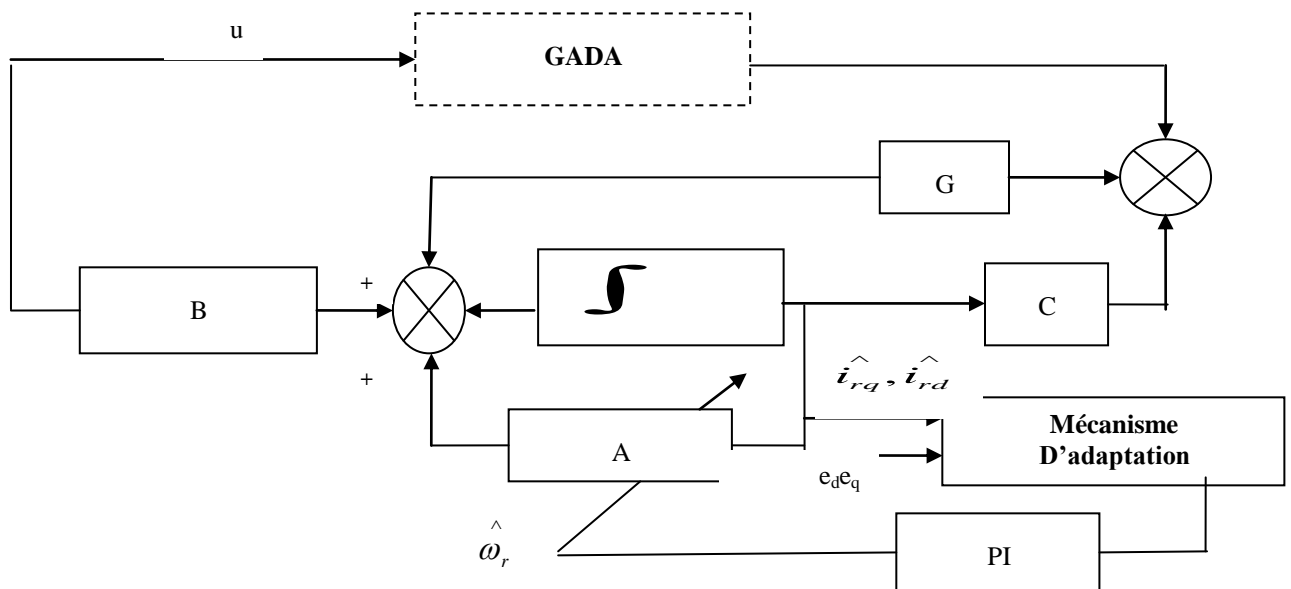
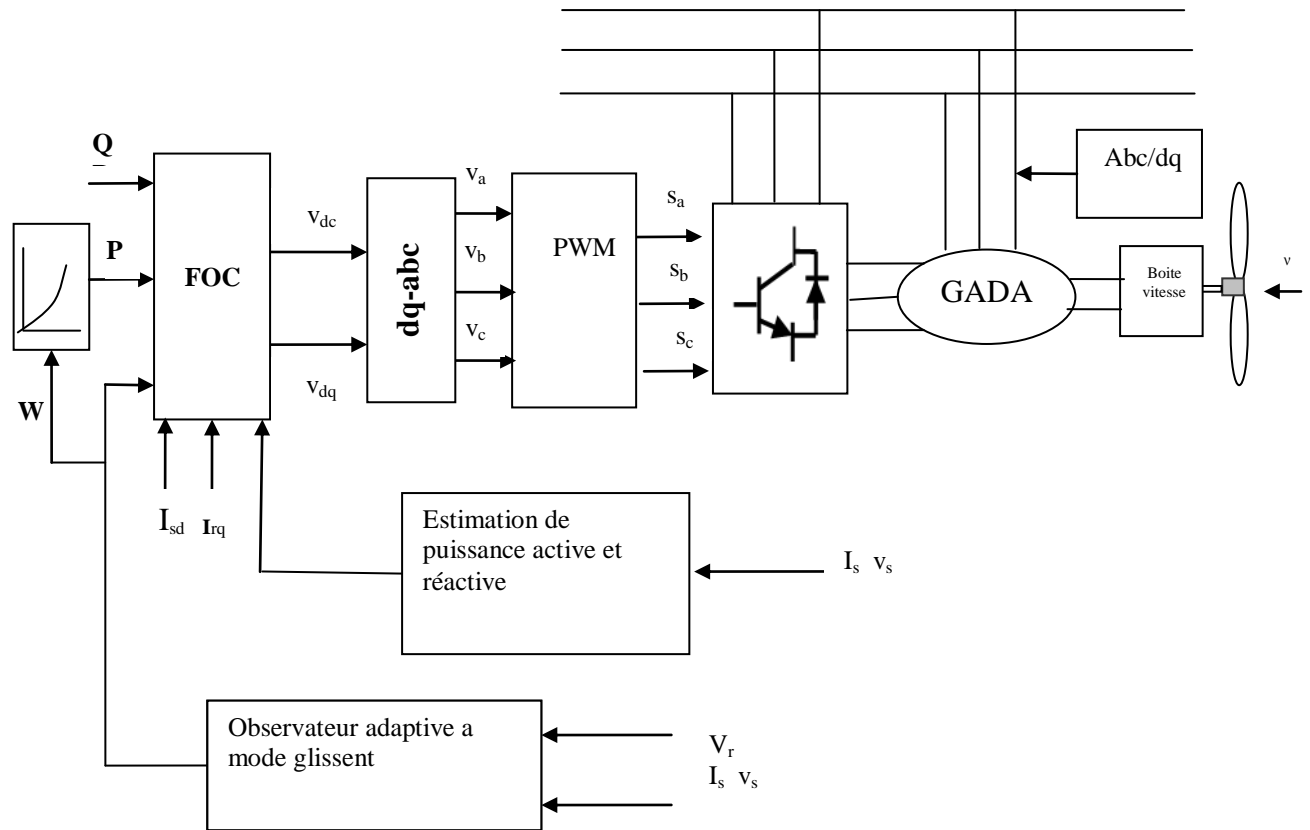


Figure (IV-1): Configuration de l'observateur adaptatif de mode glissant



Figure(IV-2): Commande sans capteur de vitesse mécanique de la GADA basée sur un observateur adaptatif mode glissant dans un système éolien à vitesse variable

IV.6.Résultats de simulation

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab /Simulink, Afin de valider les commandes étudiées ,La figure (IV-3) présente la variation du profil du vent appliqué sur les pales de l'éolienne.

En utilisant la vitesse estimée comme entrée de la commande MPPT. Les résultats de simulation de système attestent une bonne poursuite comme il est indiqué par la figure (IV.4) ,il est clair que la vitesse estimée suit fidèlement celles de la vitesse réelle dans différentes valeurs de vent.

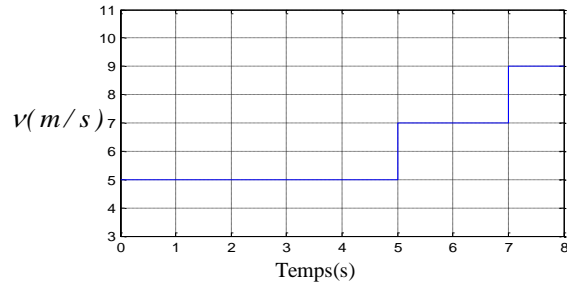


Figure (IV-3): Vitesse de vent en fonction du temps

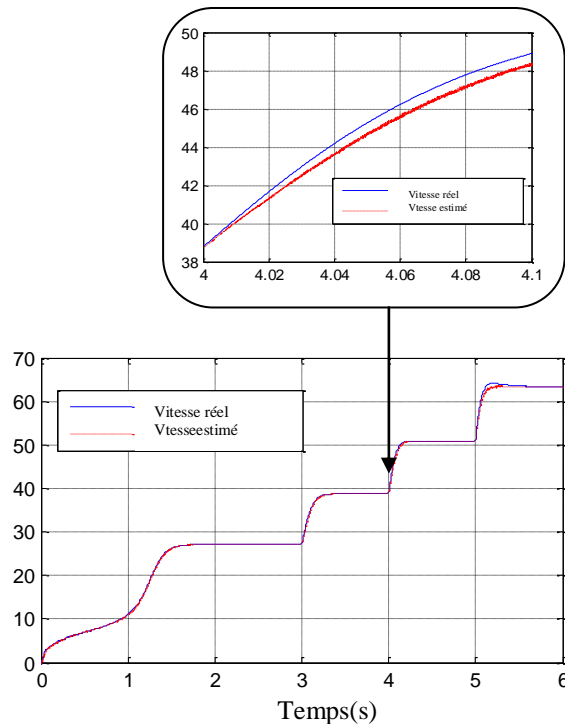


Figure (IV-4): La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glissant adaptatif avec Zoom

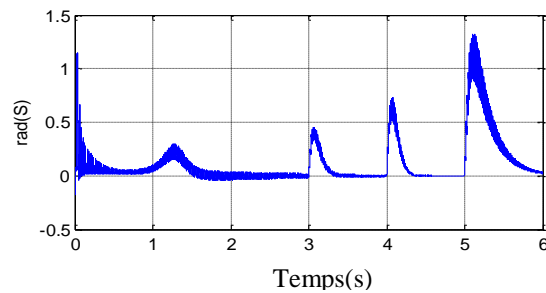


Figure (IV-5): Erreur de la vitesse estimée

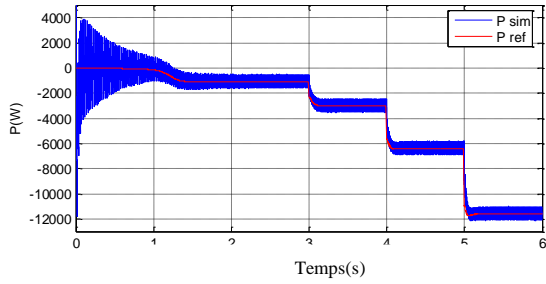


Figure (IV-6): Puissance active statorique

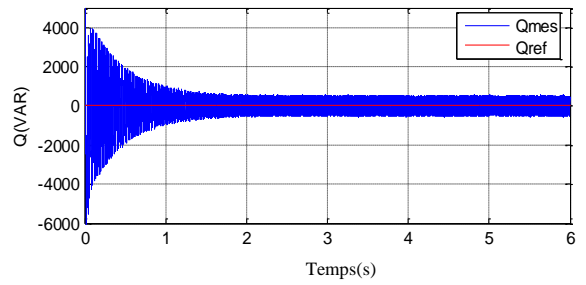


Figure (IV-7): Puissance réactive statorique et sa référent sa référence

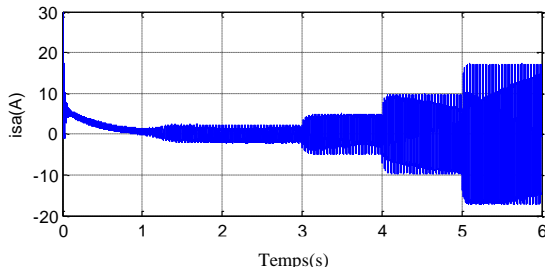


Figure (IV-8): Courant d'une phase statorique

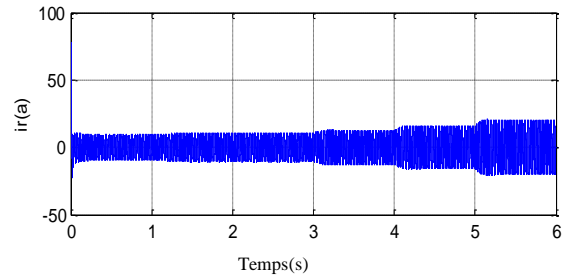


Figure (IV-9) : Courant d'une phase rotorique

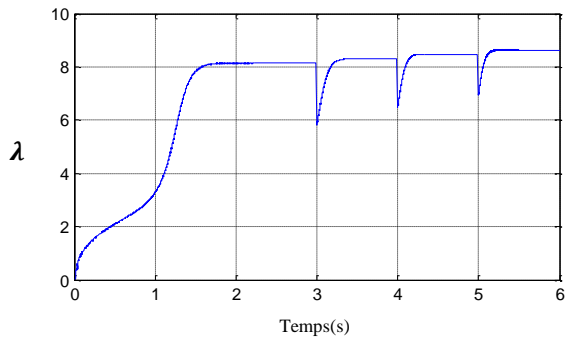


Figure (IV-10): Coefficient de puissance de la turbine

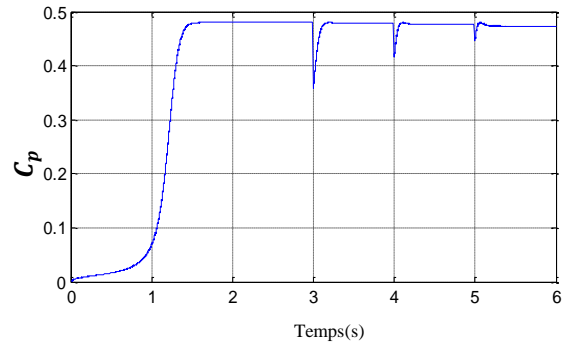


Figure (IV-11): Vitesse relative de l'éolienne

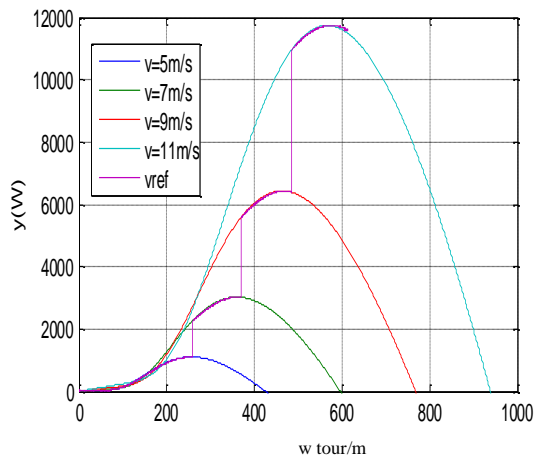


Figure (IV-12): MPPT de l'éolienne

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. - il est clair que la vitesse estimée suit fidèlement celles de la vitesse réelle dans différentes valeurs de vent et avec une erreur d'estimation très faible

Le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs et le coefficient de puissance est obtenu pour différents vents qui nous donne leurs valeurs de références optimales ($\lambda = 8.1$), les coefficients de puissance C_p restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales(0,48). - les variations du coefficient de puissance (C_p) correspondent aux changements de la réponse de l'angle de calage qui varie la vitesse de la turbine à la valeur optimale.

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.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la méthode d'estimation de la vitesse. Ensuite, les principes des observateurs d'états ont été traités, d'abord avec l'observateur de type mode glissant adaptatif.

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 caractéristique de la vitesse estimée par la l'observateur mode glissant adaptatif est satisfaisante et montre une bonne réponse dynamique au démarrage.

Conclusion Générale

Dans le cadre de la réalisation de notre mémoire nous traitons la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice. Le but étant la mise en place d'une stratégie de commande nécessaire au bon fonctionnement de l'éolienne sans capteur de vitesse.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne, on a donné un aperçu sur les différents types d'éoliennes et les différents types de conversion électromécanique.

Au chapitre deux, nous avons modélisé le système turbine éolienne associé à la MADA, on a pu voir l'intérêt de la transformée de Park qui a permis d'avoir un système d'équation facile à exploiter.

Le troisième chapitre est dédié à la réalisation de la méthode de commande, cette méthode est basée sur la commande vectorielle par orientation du flux statorique,

Le chapitre quatre présente la commande sans capteur de vitesse par l'observateur adaptatif mode glissant. Les résultats de simulation montrée des performances assez satisfaisantes en termes de faible erre d'estimation.

Notre travail constitue une modeste contribution à la commande de la MADA pour une utilisation en production d'énergie éolienne. A l'issue de cette étude des perspectives intéressantes peuvent être émises, nous pensons aux points suivants :

- ✓ Utilisation d'autres régulateurs (non linaires) pour améliorer les performances obtenues.
- ✓ Mise en place de la commandes performante pour le convertisseur coté réseau afin d'améliorer la qualité de l'énergie.
- ✓ Réalisation d'un banc d'essai pour une validation expérimentale.

*Références
bibliographiques*

- [01] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable.
- [02] Benchaib ;A. ; Application des modes de glissement pour la commande en temps réel de la machine asynchrone",Thèse de Doctorat del'Université de Nantes,2001.
- [03] N.Cherfia,"conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [04] Bouaraki Mouloud, « Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamedbougara-boumerdes, 2012.
- [05] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique,
- [06]N.Cherfia,"conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [07] I.hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", thèse de magistère, ENP, Janvier 2008.
- [08] KOUZI, K. (2008). Contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif (Thèse de Doctoral, Université de Batna 2).
- [09] 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
- [10] L.khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [11] 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.
- [12] Roberto Cardenas,Ruben, JoséProbste,GregAsher,Jon Clare “MRAS observer for sensorless control of standalone double fed indctiongenertors”IEEE Transaction on energy conver,Vol.20,NO.4,December2005.
- [13] Paul-Etienne V, “ Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation,” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut NationalPolytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [14] 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 electrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [15] 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

- [16] 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 de Batna ,2010.
- [17] F.merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)" thèse de magister de l'Ecole Nationale polytechnique, 2007
- [18] « Commande vectorielle et adaptative de la MADA » Mémoire d'ingénieur. Université de Batna [2002]
- [19] CHERIF , "Modélisation de Générateur Asynchronea Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [20] L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005
- [21] L.BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005
- [22] SMetatla , " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada", thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'alger 2009
- [23] 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
- [24] B. Beltran, "contribution à la commande robuste des éolienne 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
- [25] F.poitier, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003
- [26] M.Bouaraki "Etude d'un entrainement 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
- [27] F.poitier, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003

- [28] A.Boyette., “Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat del' université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [29] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, CristianNichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [30] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, CristianNichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [31] N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » . Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [32] A.bouhedda,"contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "thème de magister d'université Mouloud mammeri,tizi-ouzou,2011
- [33] A BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", thèse de magister ,universite 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; Aug2011, Vol. 80, p 920
- [36] A.S.Belfodhal,"modélisation et commande d'une chaine éolienne avec intégration des stockage Inertiel ",thèse de magister ,Ecole militaire polytechnique Référence Bibliographie.

Annexes

Annexe(A)

machine à induction double alimentée :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.7614 (Ω)
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 ²
Coefficient de frottement	0.0024N.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.

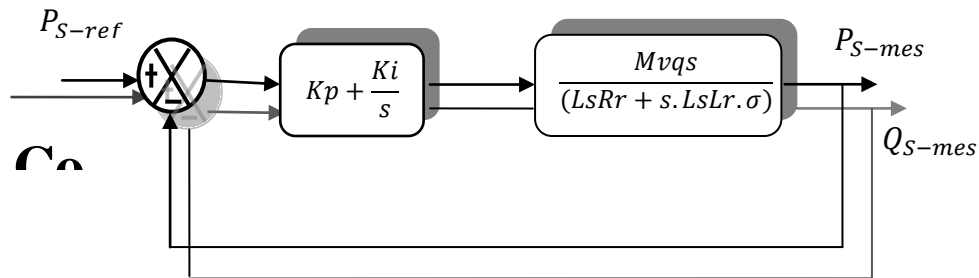


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

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

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

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

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 :

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

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

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

Avec :

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

τ 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 la même méthode sur :

↪ Boucle des courants

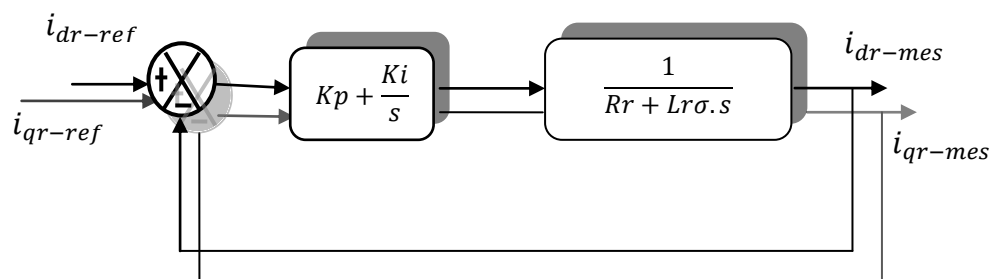


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique .

↪ Boucle de vitesse

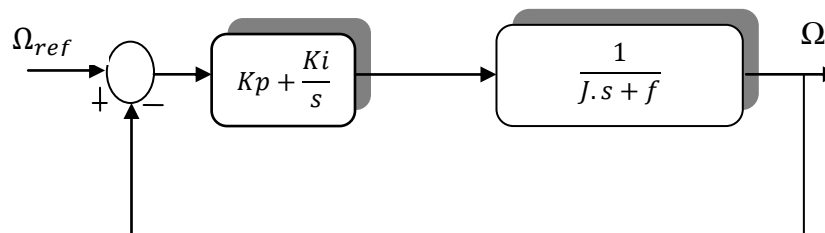


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

- Paramètres du régulateurs PI classique :

Régulateurs des puissances	Régulateurs des courants
$K_p=710.64$	$K_p=200$
$K_i=8894.5$	$K_i=50$