



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 : Machine Électriques

Thème

**Commande sans capteur de vitesse d'une
génératrice asynchrone à double alimentation
Associée à un Observateur Adaptatif**

Diriger par:

Dr: SERHOUD Hicham

Réaliser par:

- MESSAOUDI Hanane
- LASSOUED Aicha

Remerciements

Je remercie Dieu pour l'accomplissement de ses promesses et pour être le

Guide de mes pas et mon appui.

*Nous tient à remercier profondément mon encadreur le **Dr SARHOUD .H***

qui je dois tous le respect et la reconnaissance, grâce à sa patience, sa présence,

ses conseils et ses remarques, ce travail est mené à termes.

Je remercie également : Les membres du jury pour avoir accepté de lire

mon travail et m'apporté les remarques nécessaires.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à toutes

les personnes qui m'ont aidé et encouragé dans les moments pénibles (corona

virus) et qui m'ont donnée la force et la volonté de continuer et réaliser ce

modeste travail.

Dédicace

Je dédie cet humble travail à

A Mes parents

Chère mère symbole de la tendresse qui toujours soutenue

Et qui ça contribue efficacement à ma réussite

Mes Frères et Sœurs

Et Toute la famille et mes amis

LASSOUED Aicha

Dédicace

Je DEDIER ce modeste travail :

A mes parents MESSAOUDI Sayeh et AIDI Zahia

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et
ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon
Instruction et mon bien-être, pour tout le soutien et l'amour que vous me
Portez, merci, avec toute ma tendresse.*

A ma sœur et mes frères.

A mes oncles, tantes.

*Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueuse
Reconnaissance.*

A mes amis que j'aime trop.

MESSAOUDI Hanane

Résumé

Ce travail présente la commande robuste de l'énergie active et réactive sans capteur de mécanique en utilisant un observateur adaptatif d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système éolien. Le transfert de puissance entre le stator et le réseau est réalisé par action sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les performances et la robustesse sont analysées et comparées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clé : Système éolien, Contrôle sans capteur, observateurs adaptatifs, génératrice asynchrone à double alimentation, MPPT.

Abstract:

This work is devoted the sensorless vector control of active and reactive energy of a doubly fed induction machine (DFIM) by adaptive observers integrated in wind power system. The power transfer between the stator and the network is achieved by acting on the rotor signals by bidirectional converter, the performance and robustness are analyzed and compared by simulation based on software Matlab / Simulink.

Key words: Wind System, sensorless control, adaptive observers, doubly fed induction generators. MPPT.

ملخص :

يقدم هذا العمل التحكم النشط والمتفاعل للطاقة دون مستشعر ميكانيكي باستخدام مراقب تكيفي لماكينة طاقة ثنائية مدمجة في نظام الرياح. يتم نقل الطاقة بين العضو الساكن والشبكة عن طريق العمل على (Mada) غير متزامنة الإشارات الكهربائية عبر محول ثنائي الاتجاه. يتم تحليل الأداء والقوة ومقارنتهما باستخدام المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink.

الكلمات الأساسية: نظام الرياح، التحكم من دون مستشعر، المراقبين التكيفية، المولد غير المتزامن مزدوج الطاقة، MPPT.

Glossaire :

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

MADA : Machine à double alimentation

MAS : Machine asynchrone à cage

MCC : Machine à Courant Continu

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, « Maximum Power Point Tracking »

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

CCM : Convertisseur Coté MADA

CCR : Convertisseur Coté Réseau

FTBO : Fonction de transfert en Boucle Ouvert

FTBF : Fonction de transfert en Boucle Fermé

Hyper : Hyper synchronisme

Hypo : Hypo synchronisme

Notations

Liste non-exhaustive des principaux paramètres et variables.

Symbole	Signification	Unité
E_c	Énergie cinétique	mv^2
P	Masse volumique de l'air	kg/m^3
C_p	Coefficient de puissance	
C_r	Couple résistant	N.m
C_e	Couple électromagnétique	N.m
C_{vis}	Couple visqueux	N.m
C_{mec}	Couple de la génératrice	N.m
C_{aer}	Couple aérodynamique	N.m
J	Courants de phase	A
F	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	N. m. s/r
G	Glissement	
F	Fréquence du réseau électrique	Hz
k_i, k_p	Gains du régulateur PI classique	
M	Inductance magnétisante	H
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	Valeur d'inductance	H
L_s	Inductances propres statorique	H
L_r	Inductances propres rotorique	H

Notations et symboles

S	Surface balayée par le rotor de la turbine	m ²
C _{aér}	Couple aérodynamique de la turbine	W
i _{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
v _{abcr}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
i _{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques	A
v _{abcs}	Tensions instantanées 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	
B	Angle de calage des pales	deg°
A	Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal	deg°
Σ	Coefficient de dispersion	
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
Ω _{turbine}	Vitesse de la turbine	rd/sec
C _{ass}	Régulateur de vitesse	
θ	Angle entre l'axe rotorique 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

Notations et symboles

PI	Proportionnelle intégrale	
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe	
V	vitesse du vent	m/s
U	Tension composé	V
V	Tension simple	V
I	Courants de ligne	A
M	Masse de l'air	Kg
G	Gain du multiplicateur	

Liste des Figures

Figure (I.1) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	6
Figure (I.2) : Principes composants d'une éolienne.	6
Figure (I.3) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	7
Figure (I.4) : Principes composants d'une éolienne.	8
Figure (I.5) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur.	8
Figure (I.6) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable.....	9
Figure (I.7) : Petite éolienne à axe horizontal.	10
Figure (I.8) : Tube de courant autour d'une éolienne	11
Figure (I.9) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.....	13
Figure (I.10) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable. .	13
Figure (I.11) : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.	15
Figure (I.12) : MADA structure Kramer.	15
Figure (I.13) : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	16
Figure (I.14) : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	17
Figure (II.1) : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique	21
Figure (II.2) : Structure de la machine.	22
Figure (II.3) : fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.	23
Figure (II.4) : fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.	23
Figure (II.5) : fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	24
Figure (II.6) : fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	24
Figure (II.7) : Eolienne installée en mer.....	25
Figure (II.8) : Schéma de principe d'un aérogénérateur à nase de la MADA.....	26
Figure (II.9) : Représentation simplifié de la MADA.	28
Figure (II.10) : Modèle de PARK de la MADA.....	30
Figure (II.11) : Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	31
Figure (II.12) : Orientation du flux statorique sur l'axe d.....	32
Figure (II.13) : schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique.....	35
Figure (II.14) : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.	36
Figure (II.15) : Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.	37
Figure (II.16) : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.....	38
Figure (II.17) : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	39
Figure (II.18) : Génération des Signaux de commande MLI de l'onduleur.....	41

Liste des Figures

Figure (III.1) : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.....	45
Figure (III.2): Principales composants de l'éolienne à axe horizontale.	45
Figure (III.3): Eoliennes à vitesse variable.....	46
Figure (III.4): Les différents modes de fonctionnement de la GADA.	46
Figure (III.5): Schéma d'un système éolien.	47
Figure (III.6): Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$	48
Figure (III.7) : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	50
Figure (III.8) : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolien de grande puissance. ..	50
Figure (III.9): Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	52
Figure (III.10): Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	53
Figure (III.11): Variation de l'angle de calage d'une pale.	54
Figure (III.12): La vitesse rotorique	55
Figure (III.13): Vitesse de vent en fonction du temps.	55
Figure (III.14) : Puissance active statorique.	55
Figure (III.15) : Puissance réactive statorique et sa référent.....	55
Figure (III.16) : Courant d'une phase statorique.	56
Figure (III.17) : Courant d'une phase rotorique.	56
Figure (III.18): coefficient de puissance.....	56
Figure (III.19) : Flux statorique de la MADA	56
Figure (III.20) : coefficient de puissance.....	57
Figure (III.21) : Vitesse relaive de l'éolienne.....	57
Figure (III.22) : Puissance active statorique.....	57
Figure (III.23): Puissance réactive statorique.....	57
Figure (III.24) : La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glisse adaptative.	58
Figure (III.25) : Vitesse de vent en fonction du temps.....	58
Figure (III.26) : Courant d'une phase statorique.	58
Figure (III.27) : Flux statorique de la MADA.....	58
Figure (III.28) : MPPT de l'éolienne	58
Figure (IV-1) : Configuration de l'observateur adaptive.	66
Figure (IV-2) : Commande sans capteur de vitesse mécanique de la GADA basée sur un observateur adaptative mode glisse dans un système éolien à vitesse variable	66
Figure (IV.3) Vitesse de vent en fonction du temps.....	67

Liste des Figures

Figure (IV.4): La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glissant adaptative avec Zoom.....	67
Figure (IV.5) : Erreur de la vitesse estimée.....	68
Figure (IV-6): Puissance active statorique	68
Figure (IV-7): Puissance réactive statorique et sa référencent sa référence.....	68
Figure (IV.8): Courant d'une phase statorique.....	68
Figure (IV.9) : Courant d'une phase rotorique	68
Figure (IV.10): Vitesse relative de l'éolienne	69
Figure (IV.11): Coefficient de puissance de la turbine	69
Figure (IV-12) : MPPT de l'éolienne.....	69
Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.....	80
Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique.....	81
Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.....	81

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Glossaire	
Notations.....	
Liste des Figures	
Sommaire.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Introduction aux systèmes éolienne

I.1 Introduction	5
I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	5
I.3 Définition de l'énergie éolienne	6
I.4 Constitution d'une éolienne.....	6
I.4.1 Principe	6
I.4.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne :	7
I.5 Les types d'éolienne	8
I.5.1 Éoliennes à axe vertical	8
I.5.2 Éolienne à axe horizontale	9
I.6 Énergie disponible dans le vent	10
I.6.1 le coefficient de puissance C_p	10
I.6.2 Théorie de Betz :.....	11
I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	12
I.7.1 Machines asynchrones à cage (MAS).....	12
I.7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor bobiné)	14
I.8 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	14
I.9 Machine asynchrone à double alimentation	15
I.9.1 structure de Kramer	15
I.9.2 structure de Scherbius avec cyclo convertisseur.....	16
I.9.3 structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	16
I.10 Choix de vitesse variable dans le système éolienne	17
I.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	18
I.11.1 Les avantage	18

I.11.2 Les inconvénients	18
I.12 Conclusion	19
Chapitre II : Étude et modélisation d'une MADA	
II.1 Introduction	21
II.2 Constitution de la MADA	21
II.3 Structure de la machine	21
II.4 Fonctionnement de la MADA	22
II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	22
II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	23
II.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	23
II.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone	24
II.5 Domaines d'application de la MADA	24
II.5.1 l'application de la MADA dans les systèmes éoliens	25
II.6 Avantages et inconvénients de la MADA	26
II.6.1 Avantages de la MADA	26
II.6.2 Inconvénients de la MADA	27
II.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	27
II.7.1 Hypothèses	27
II.7.2 Modèle mathématique de la MADA	28
II.7.2.1 Equation électrique	28
II.7.2.2 Equations magnétiques	28
II.7.2.3 Equation mécaniques	29
II.7.3 Modèle biphasé de la MADA	29
II.7.3.1 Application de la transformation de Park	29
II.7.3.2 Equations électriques	31
II.7.3.3 Équations magnétiques	31
II.7.3.4 équations mécaniques	31
II.8 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	32
II.8.1 Principe	32
II.8.2 Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté	32
II.8.3 Types de commande vectorielle	35
II.8.3.1 Commande vectorielle directe	36
II.8.3.2 Commande vectorielle indirecte	36
II.8.3.2.1 Commande indirecte en boucle ouverte	37

II.8.3.2.2 Commande indirecte en boucle fermée (Commande avec boucle de puissance)	37
II.8.4 Type du régulateur PI	38
II.8.5 Onduleur de tension a deux niveaux	38
II.8.5.1 Modèle de l'onduleur a deux niveaux	38
II.8.5.2 Stratégie de commande	40
II.8.5.3 Algorithme de commande	40
II.10. Conclusion.....	41

Chapitre III : les énergies éoliennes à vitesse variable

III.1 Introduction.....	43
III.2 Description de l'éolienne.....	43
III.3 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal	44
III.4 Les éoliennes à vitesse variable	46
III.4.1 Génératrice en hypo synchronisme	46
III.4.2 Génératrice en hyper synchronisme	47
III.5 Modélisation des éoliennes	47
III.5.1 Modèle du multiplicateur	49
III.5.3 Schéma bloc du modèle de la turbine	49
III.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	50
III.7 Techniques d'extraction du maximum de la puissance	51
III.7.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	51
III.7.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	52
III.7.3 Système d'orientation des pales	54
III-8 Résultat de simulation :	55
III -8-1 MPPT avec asservissement :	55
III -8-2 MPPT sans asservissement :	57
III -9 Conclusion	59

Chapitre IV: Commande sans capteur de la GADA associé à un observateur adaptatif

IV.1. Introduction	61
IV.2. Les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique	61
IV.2.1. Estimation de la vitesse avec modèle de la machine	61
IV.2.2. Estimation de la vitesse sans modèle de la machine.....	63
IV.3. Estimation de la vitesse de la MADA par observateur adaptative.....	63
IV.6. Résultats de simulation	67

Sommaire

IV.7. Interprétation des résultats	69
IV.10. Conclusion	70
Conclusion	71
Références bibliographiques.....	74
Annexes.....	78

Introduction générale

Introduction Générale

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

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

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

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

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

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres.

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

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

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

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

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

Finalement ce travail sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I : Introduction aux systèmes éolienne

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Une source d'énergie est nouvelle si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre (biomasse).

Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conservation énergie renouvelable.

Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur environnement, les énergies renouvelables s'imposant comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux.

L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre.

Elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante +30% par an en moyenne depuis 10 ans. Une éolienne est une machine utilisant la force motrice de vent.

Cette force peut-être utilise mécaniquement ou pour se produire d'électricité. On parle de Park éolienne ou de ferme éolienne pour décrire des unités groupées pour la production d'énergie électrique. Ces unités peuvent être installées en terre ou mer.

Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies

Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique de nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail.

Historiquement, en 1888 Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs.

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu des 19Ème siècle), La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.

I.3 Définition de l'énergie éolienne

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

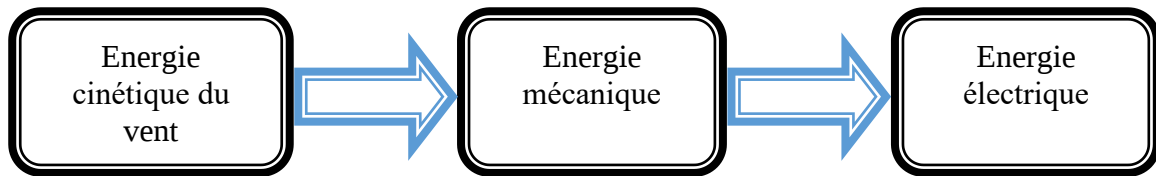


Figure (I.1) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

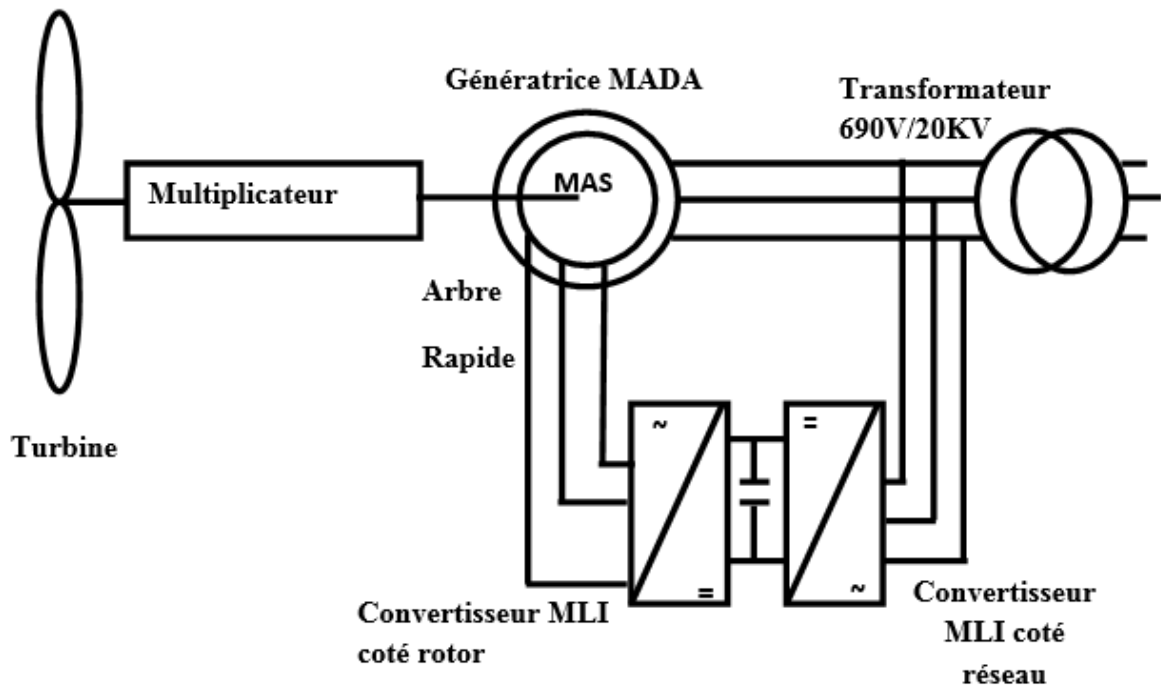


Figure (I.2) : Principes composants d'une éolienne.

I.4 Constitution d'une éolienne

I.4.1 Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes : - au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur

le réseau électrique. Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

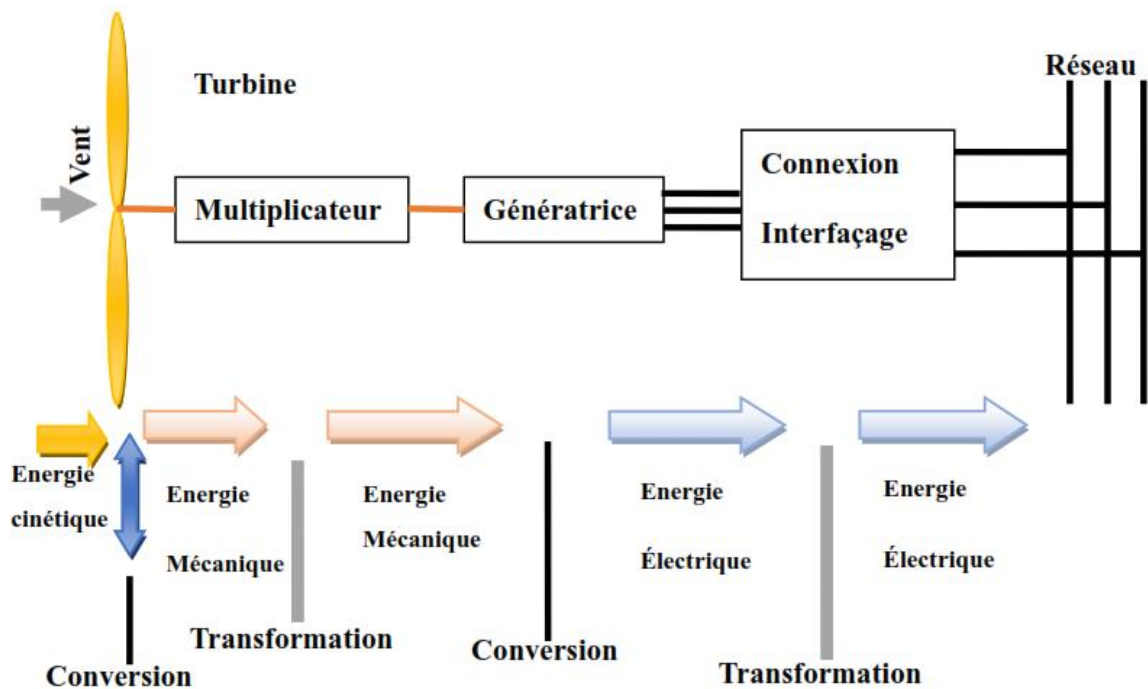


Figure (I.3) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.

I.4.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure 1.4. Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- **le mât** : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc.).

- **le rotor** : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.

- **La nacelle** : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).

- **Les pales** : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en compte pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

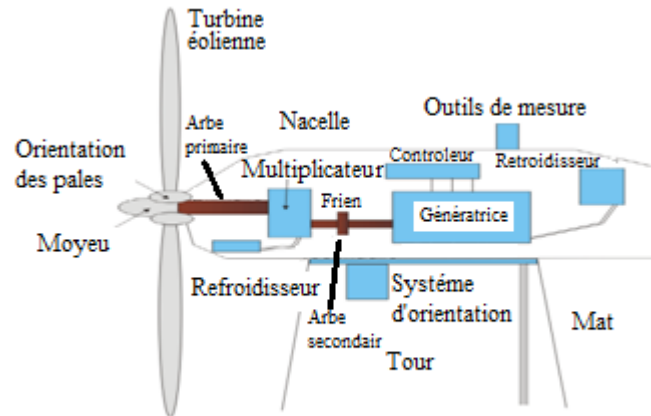


Figure (I.4) : Principes composants d'une éolienne.

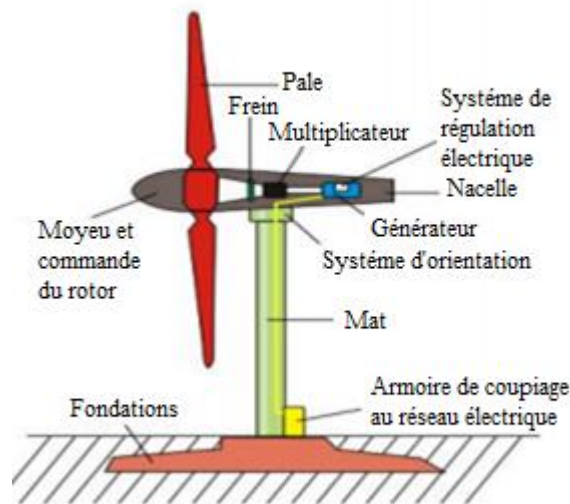


Figure (I.5) : Exemple de système éolien de type aérogénérateur.

I.5 Les types d'éolienne

On note que les éoliennes se divisent en deux parties (famille), des éoliennes à axe horizontal et celle à axe vertical.

I.5.1 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol.

donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation.

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par

La circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.6).

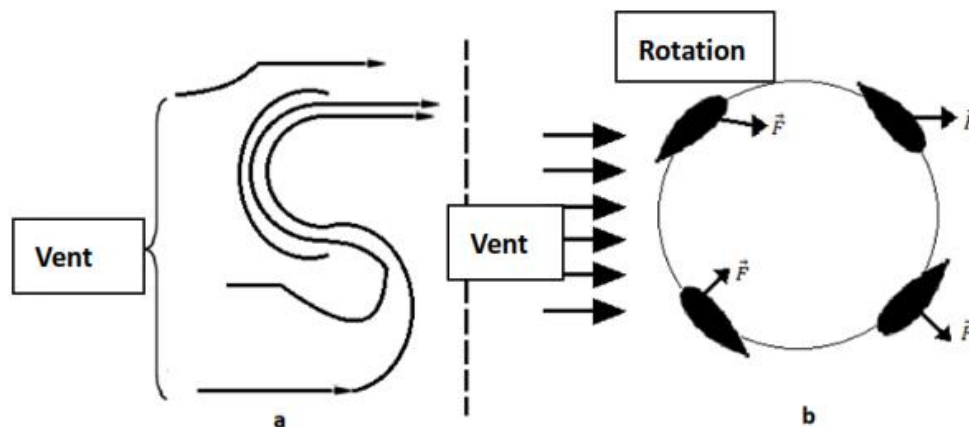


Figure (I.6) : Principe du rotor de Savonius et l'incidence variable.

I.5.1.1 Les caractéristique des éoliennes VAWT

- Lentes (faible bruit)
- pas de dispositif d'orientation des pales
- Faible rendement aérodynamique
- Grande sensibilité de C_p à la vitesse

I.5.2 Éolienne à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technique ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripal étant 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 Transformation

Coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure (I.7) : Petite éolienne à axe horizontal.

I.6 Énergie disponible dans le vent

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 :

$$E_c = 0,5 m V^2$$

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors :

$$E = 0,5 \rho S V^3$$

Où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$).

I.6.1 le coefficient de puissance C_p

En tenant compte du coefficient de puissance C_p , le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance P défini par la relation :

$$P = 0,5 C_p \rho A V^3$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine n et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda)$$

$$\text{Avec : } \lambda = R\Omega/v$$

Où R est le rayon de l'hélice et $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout des pâles. On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie de Rankine – Froude

I.6.2 Théorie de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I .8) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à traverser le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

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

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

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

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1) :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

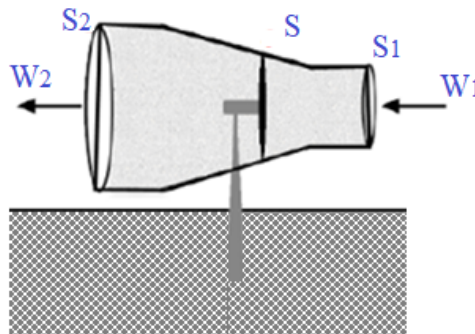


Figure (I.8) : Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mT} = \frac{\rho S V_1^2}{2} \quad (1.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mT}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{4} \quad (1.5)$$

I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Une machine par définition est un ensemble d'appareils ou d'organes qui sont combinés pour « Recevoir » une forme d'énergie. La «transformer» ou la «convertir», pour la «restituer» par la suite sous une autre forme pour «PRODUIRE» un effet donné.

On peut classer dans cette catégorie et cela du point de vue physique : une turbine,

Une pompe un compresseur, un moteur, un générateur etc...., puisqu'ils transforment, convertissent, ou produisent une certaine énergie.

D'une manière générale, on ne classe pas dans catégorie des « Machines électriques » celles utilisant ou produisant de l'énergie électrique. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

I.7.1 Machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en matière d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales importantes), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator

(nombre de pôles) est donc l'utilisation des machines du type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure 1.8), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesses) et donc très rarement exploitée (Figure 1.9).

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.

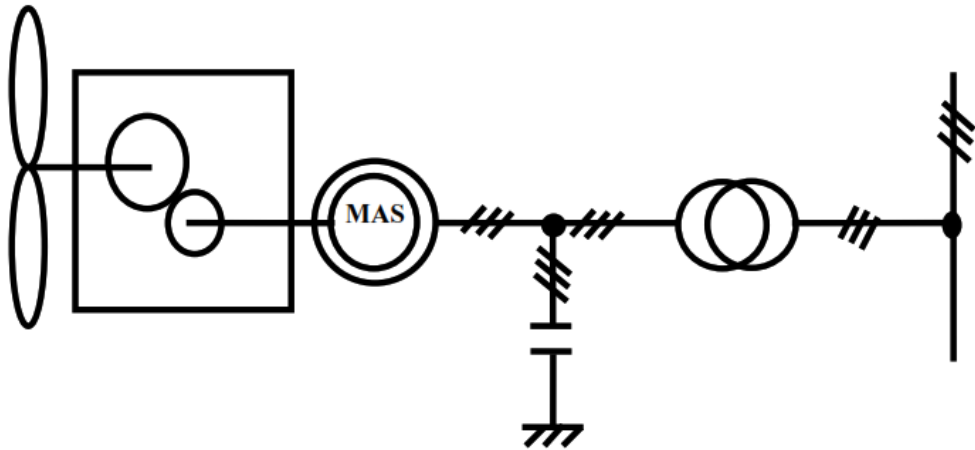


Figure (I.9) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.

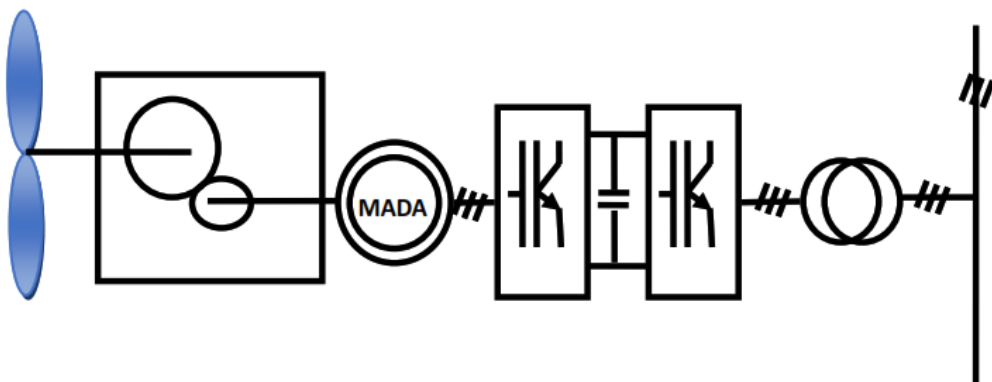


Figure (I.10) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (*rotor bobiné*)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a

Le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement

De la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté était que la fréquence des courants rotoriques est égale à 9 fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur.

I.8 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 1.10), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

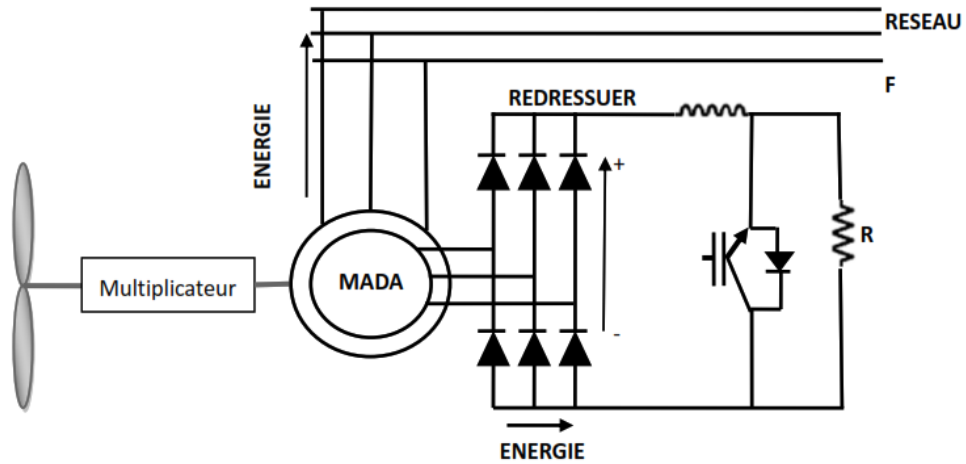


Figure (I.11) : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

I.9 Machine asynchrone à double alimentation

I.9.1 structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure. (I.12)).

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine.

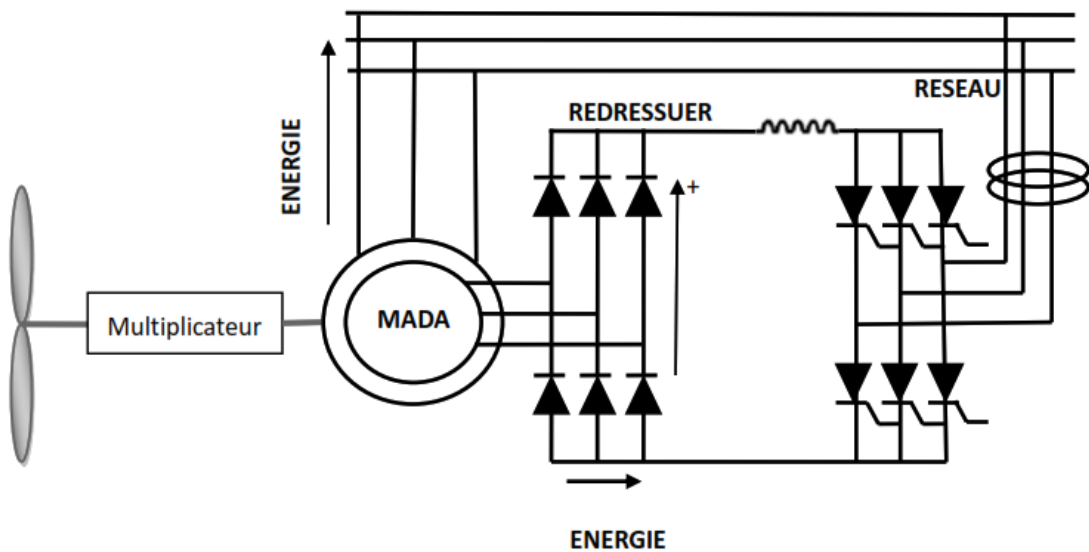


Figure (I.12) : MADA structure Kramer.

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

I.9.2 structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau,

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure I-13), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure (I-13).

En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

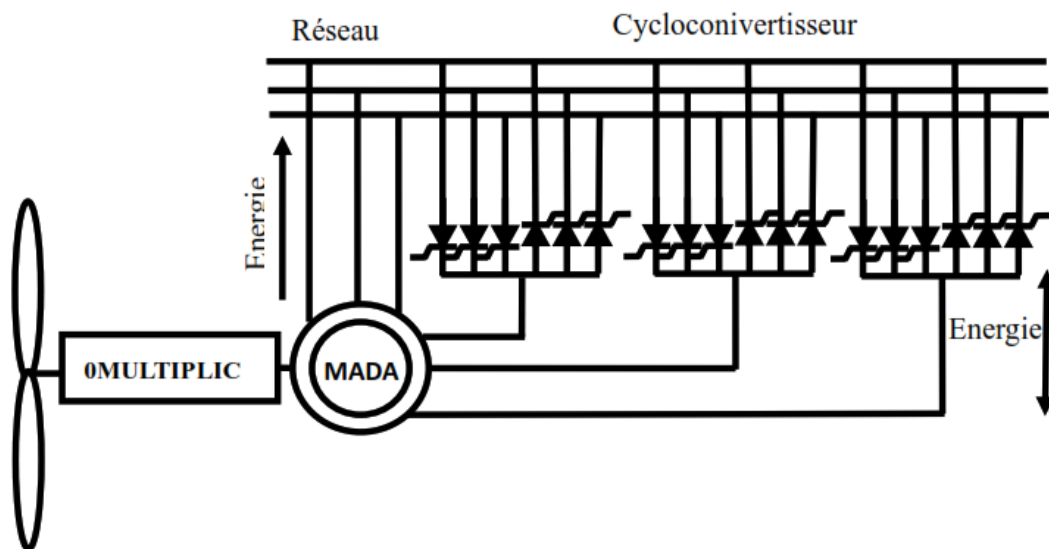


Figure (I.13) : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

I.9.3 structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure I-13) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions dont la modularité permet

de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à

Celle de la MADA du type "brushless ». Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hypers et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

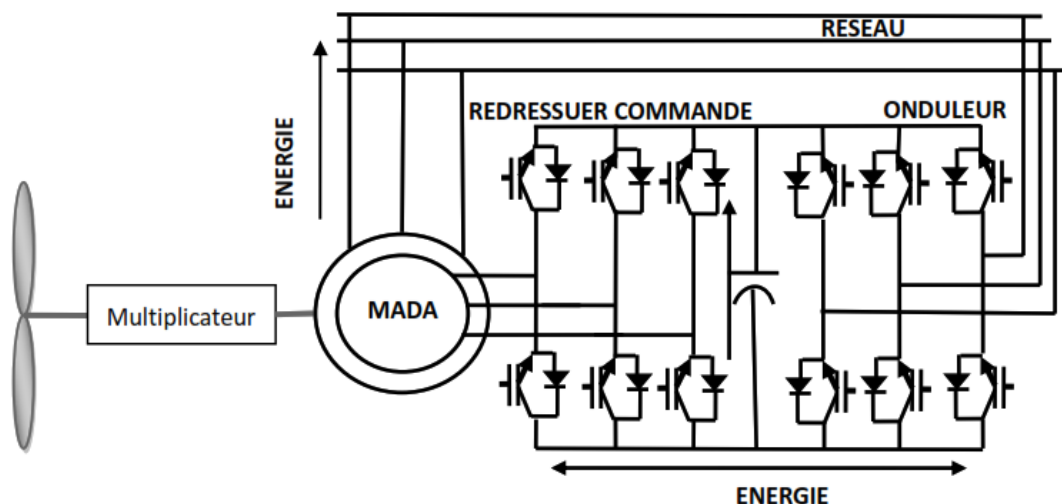


Figure (I.14) : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

I.10 Choix de vitesse variable dans le système éolienne

Le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un

dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci est connecté entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique. Le développement de l'électronique de puissance (moins coûteuse et plus performante) a permis l'implantation de systèmes de GVV en proposant des solutions qui éliminent ou réduisent les problèmes de la GVC. Le surcoût électronique des systèmes de GVV n'est pas rédhibitoire par rapport à ses avantages au niveau du système mécanique, en termes de maintenance, et de durée de vie. Mieux encore, grâce à l'électronique de puissance, la qualité de l'énergie électrique générée est nettement supérieure et les normes de connexion sont aisément respectées [3].

I.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

I.11.1 Les avantage

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [2].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [2].
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- 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 mille tonnes de SO₂ et 17.5 mille tonnes de Nox. Ces émissions sont les responsables des pluies acides [1].

I.11.2 Les inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur.
- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [2].
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous sommes présentés l'introduction aux systèmes éolienne est leur principe, après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne sont différents types d'éoliennes.

Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse Variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation.

Chapitre II : Étude et modélisation d'une MADA

II.1 Introduction

Afin de produire de l'électricité pour différentes vitesses de vent à partir des éoliennes, nous avons choisi d'utiliser la machine asynchrone double alimentation (MADA)

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

II.2 Constitution de la MADA

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure II.1). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnelle en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [4].

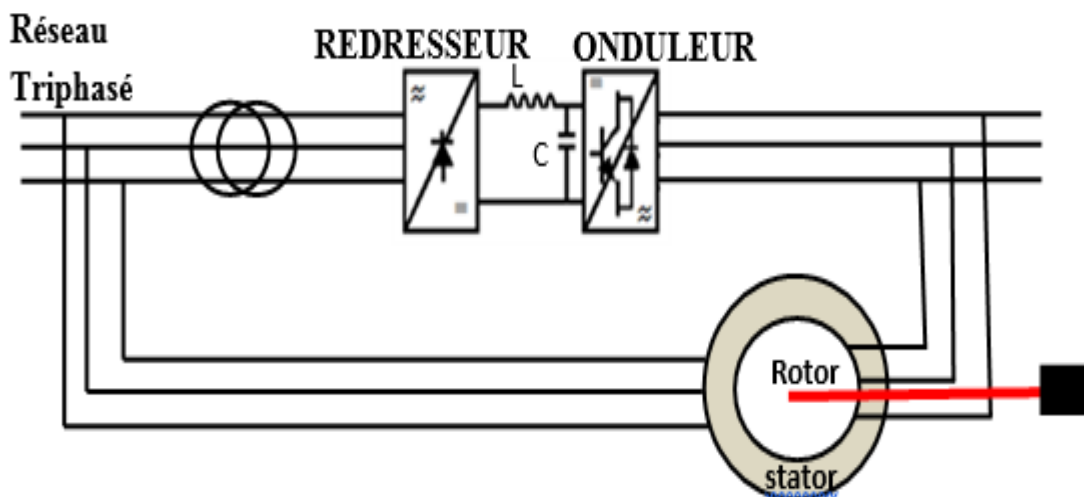


Figure (II.1) : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimentée par un seul convertisseur statique [4]

II.3 Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants

ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure II.2 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courant de rotor [5].

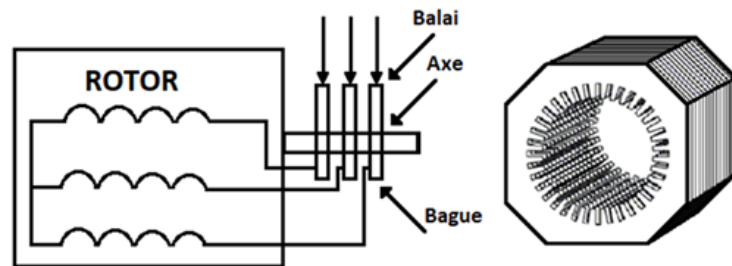


Figure (II.2) : Structure de la machine [5].

II.4 Fonctionnement de la MADA

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

II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La figure (II.3) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme de mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [5].

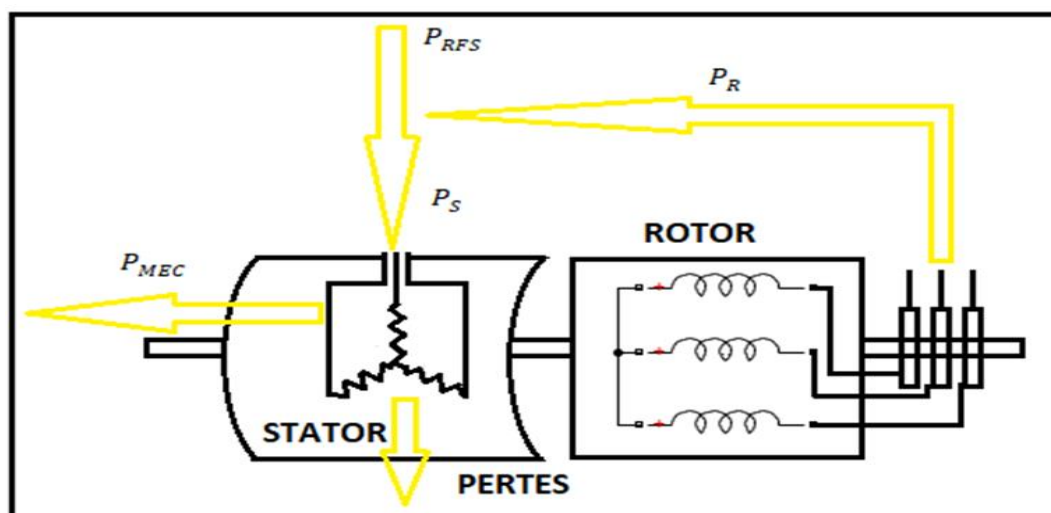


Figure (II.3) : fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone[4].

II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

La figure (II.4) montre que la puissance est fournie par le réseau au rotor et stator. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [5].

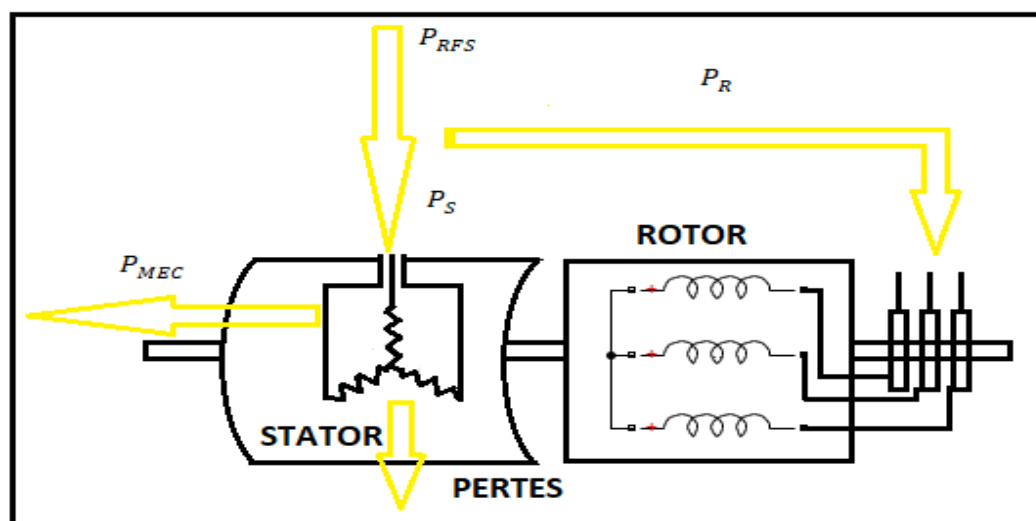


Figure (II.4) : fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone[4].

II.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

La figure (II.5) montre que la puissance fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [5].

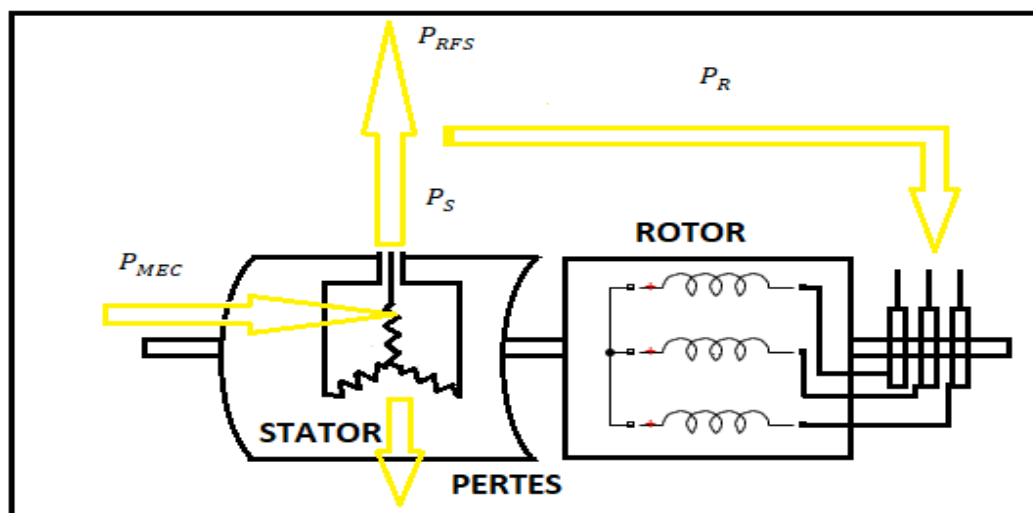


Figure (II.5) : fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [4].

II.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

Lorsque la vitesse augmente, le générateur fonctionne en hyper synchronisme. La figure montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte Joule dans le rotor [5].

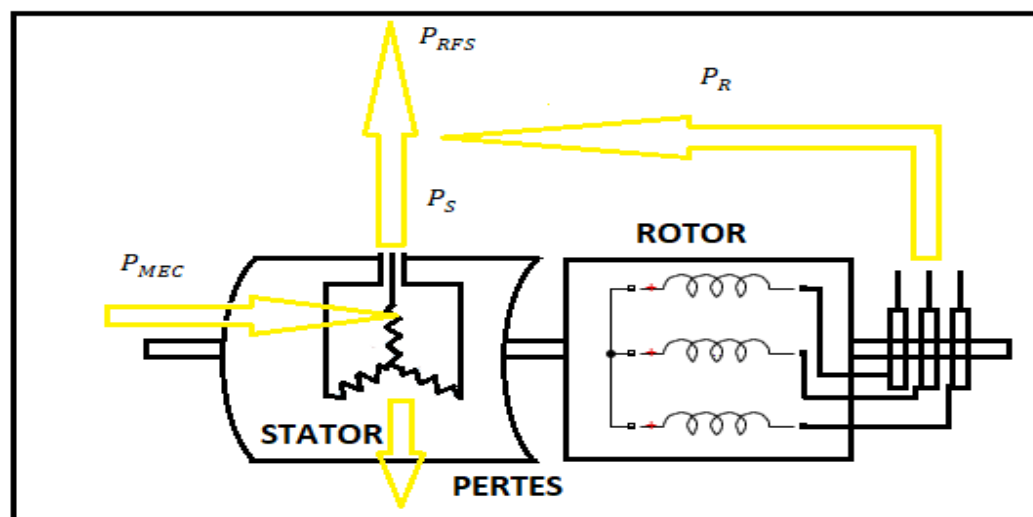


Figure (II.6) : fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone[4].

II.5 Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse

opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans les applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constant (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [6].

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

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

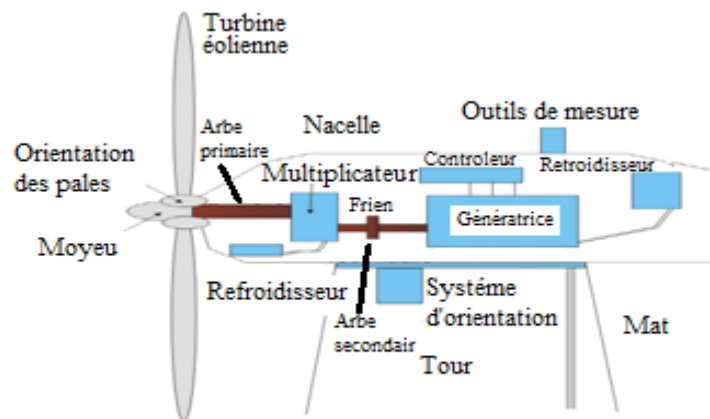


Figure (II.7) : Eolienne installée en mer [6].

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

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

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

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

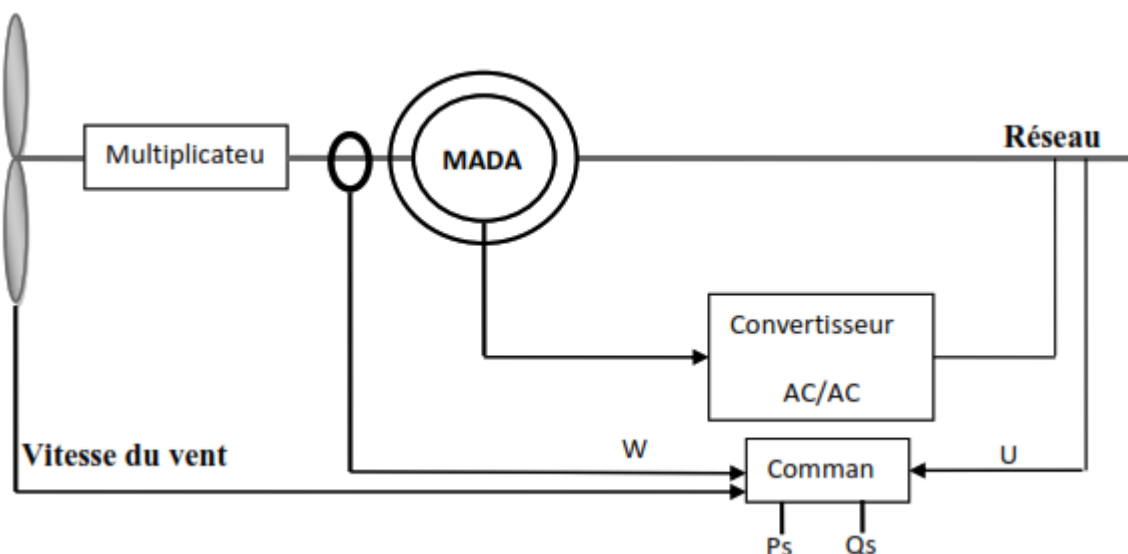


Figure (II.8) : Schéma de principe d'un aérogénérateur à nase de la MADA [6].

II.6 Avantages et inconvénients de la MADA

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

II.6.1 Avantages de la MADA

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [7].

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance [4].

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [8].

- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques - Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [4].

- le circuit du rotor de la MADA peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ainsi au niveau du rotor, un convertisseur de haute commutation pourra être employé afin de réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation d'harmoniques et d'amélioration des rendements [8].

II.6.2 Inconvénients de la MADA

- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance [7].
- Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes à bagues et balais [8].

II.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent [4].

II.7.1 Hypothèses

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables.
- les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques [4].
- La fmm créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale [8].
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable [8].
- les circuits magnétiques non saturés, perméabilité constante [4].
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable [8].
- Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire [8].

La MADA est munie de six enroulements, trois au stator (S_a, S_b, S_c) et trois au rotor (R_a, R_b, R_c). Les enroulements du stator sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de $(2\pi/3)$ degrés l'un par rapport à l'autre.

La figure (II.9) montre la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).

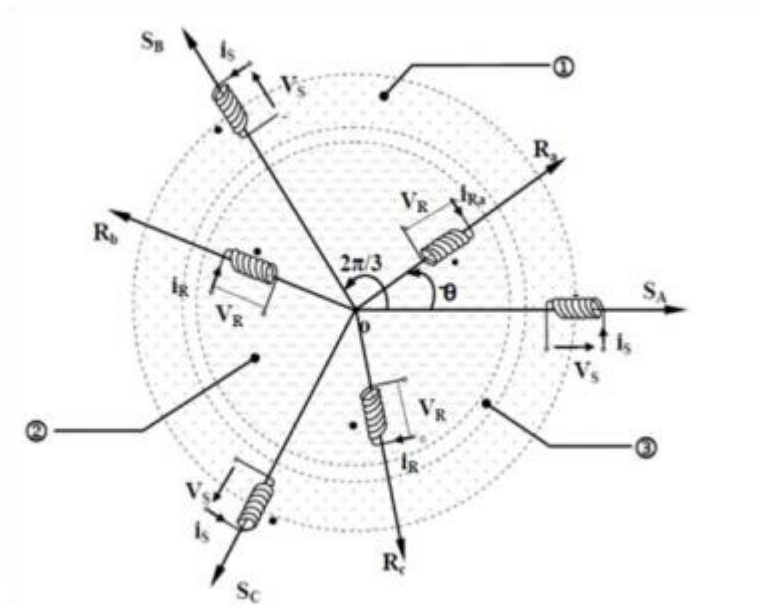


Figure (II.9) : Représentation simplifié de la MADA [8].

II.7.2 Modèle mathématique de la MADA

II.7.2.1 Equation électrique

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

Pour l'enroulement statoriques :

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

Pour l'enroulement rotoriques :

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

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

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

II.7.2.2 Equations magnétiques

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

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \end{cases} \quad (2.3)$$

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

Et

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

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

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

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (2.4)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (2.5)$$

II.7.2.3 Equation mécaniques

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

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \cdot \Omega \quad (2.6)$$

II.7.3 Modèle biphasé de la MADA

II.7.3.1 Application de la transformation de Park

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

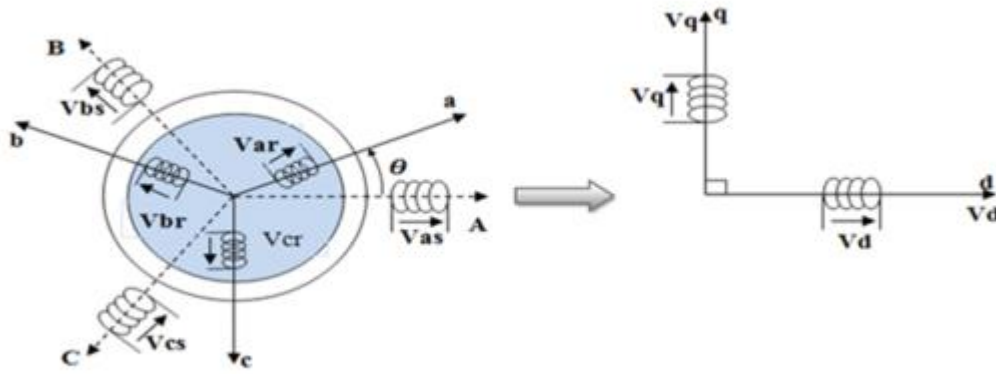


Figure (II.10) : Modèle de PARK de la MADA [5].

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

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

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Il est noté par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques ((θ_r) . Rotoriques) (figure (II.10)).

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

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

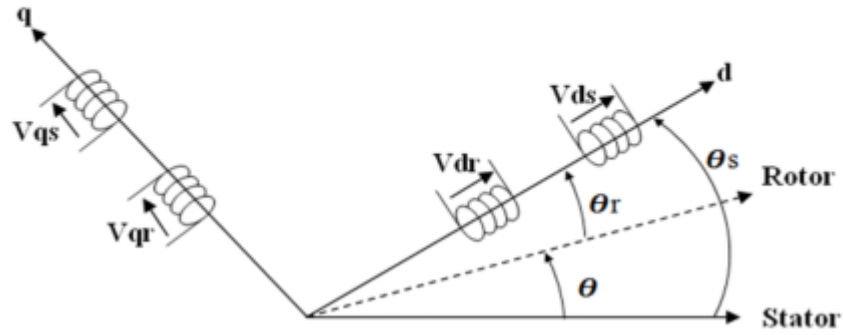


Figure (II.11) : Représentation de la machine dans le repère diphasé [8].

II.7.3.2 Equations électriques

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (2.1) du stator et l'équation (2.2) du rotor, Les expression des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d,q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.9)$$

II.7.3.3 Équations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.10)$$

II.7.3.4 équations mécaniques

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

$$C_e = p(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (2.11)$$

$$C_e = p \cdot M(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (2.12)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (2.13)$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (2.14)$$

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

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une très bonne solution pour des applications hautes performances comme les systèmes de génération de l'énergie électrique et l'entraînement à vitesse variable [9].

II.8.1 Principe

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone

φ_s , φ_r au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple [10].

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

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [4].

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (2.15)$$

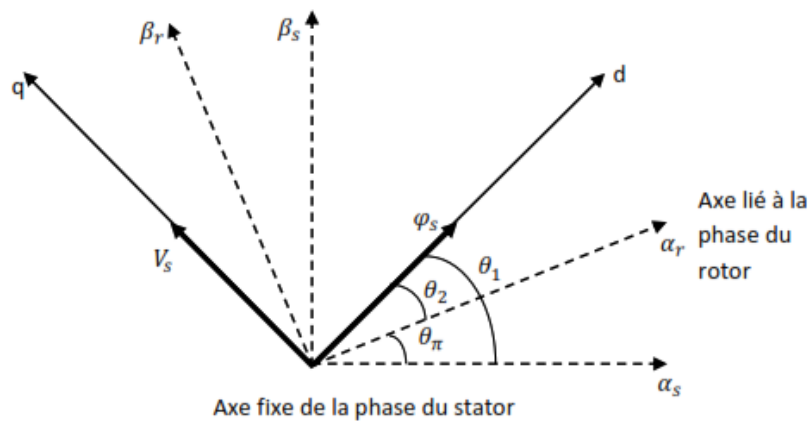


Figure (II.12) : Orientation du flux statorique sur l'axe d [4].

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \quad (2.16)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (2.17)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (2.16) montre que le couple électromagnétique C_{em} produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique I_{qr} [4].

De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes [4].

Ainsi on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (2.18)$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (2.19)$$

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

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (2.20)$$

D'après les équations (2.18) et (2.19) on a :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (2.21)$$

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (2.20) les flux rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{MV_s}{L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (2.22)$$

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

Les expressions des flux rotoriques d'axe d et q de l'équation (2.22) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (2.9), on obtient alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.23)$$

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

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

Finalement on obtient :

$$\begin{cases} I_{dr} = \left(\frac{-1}{R_r + p L_r \sigma} \right) [V_{dr} + (g \omega_s L_r \sigma) I_{qr}] \\ I_{qr} = \left(\frac{-1}{R_r + p L_r \sigma} \right) [V_{qr} + (g \omega_s L_r \sigma) I_{dr} - g \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s] \end{cases} \quad (2.24)$$

Remarque

Le troisième terme dans les deux équations (2.23) peut être négligée car son influence est très faible [4].

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent [4], nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_{dr} I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_s \end{cases} \quad (2.25)$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances, active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [4]

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

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

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (2.27)$$

D'après les équations (2.19), (2.20) et (2.27) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \psi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (2.28)$$

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

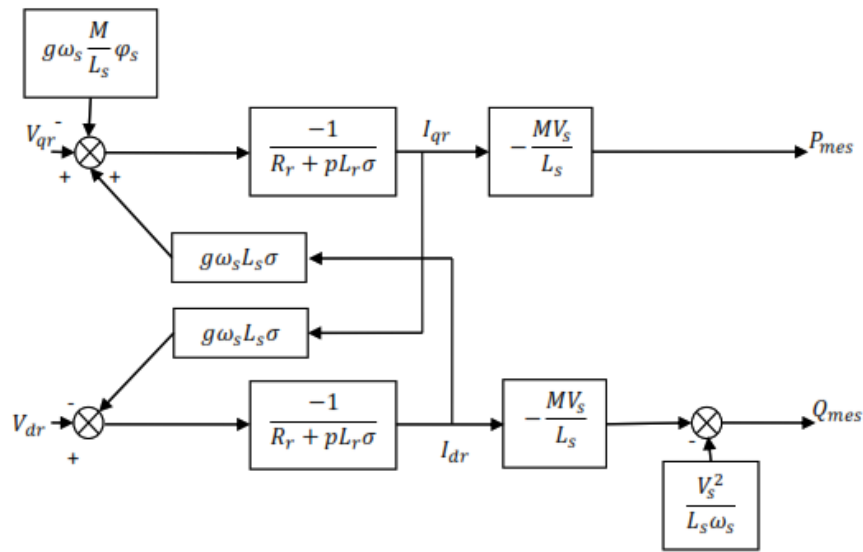


Figure (II.13) : schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique [7].

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique.

II.8.3 Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase). Deux méthodes ont été développées soit [7] :

La commande vectorielle directe.

La commande vectorielle indirecte.

II.8.3.1 Commande vectorielle directe

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

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

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

Cette commande n'est donc pas optimale [7].

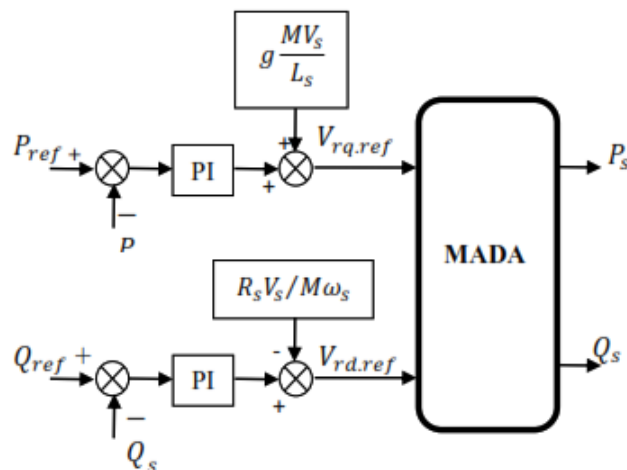


Figure (II.14) : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances [7].

II.8.3.2 Commande vectorielle indirecte

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [7].

II.8.3.2.1 Commande indirecte en boucle ouverte

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure (II-13) [11].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliqué à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte.

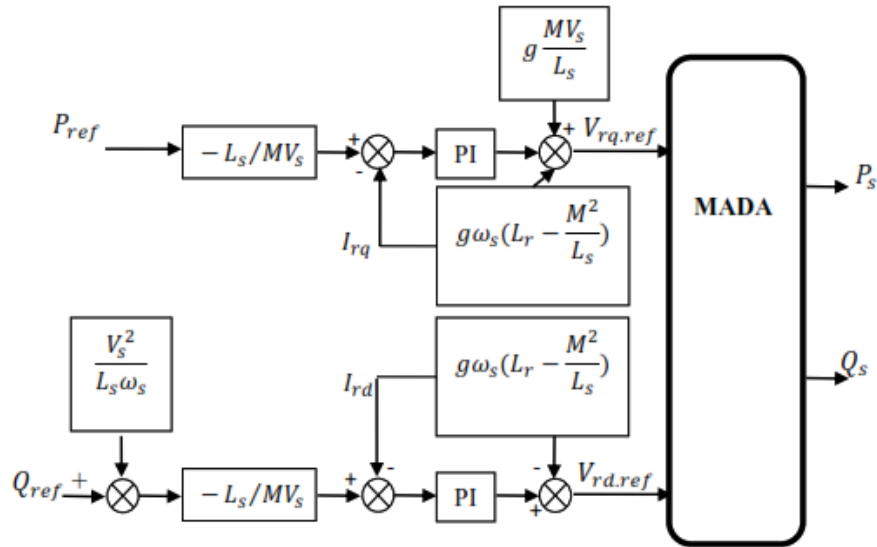


Figure (II.15) : Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte [7].

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

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (II-14) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle [11].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe,

puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants et les puissances et Ps en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure (II.14).

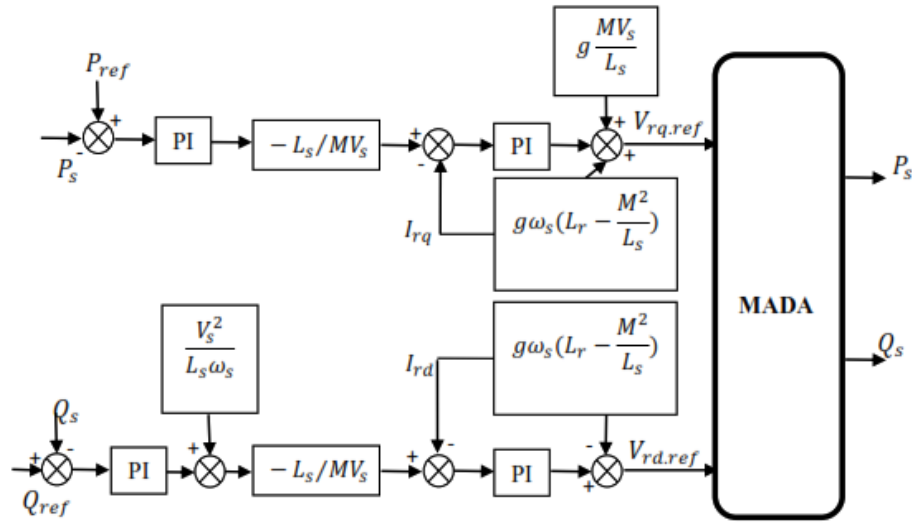


Figure (II.16) : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée [7].

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

II.8.4 Type du régulateur PI

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} et i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre. Ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [7]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

II.8.5 Onduleur de tension a deux niveaux

II.8.5.1 Modèle de l'onduleur a deux niveaux

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II.16).

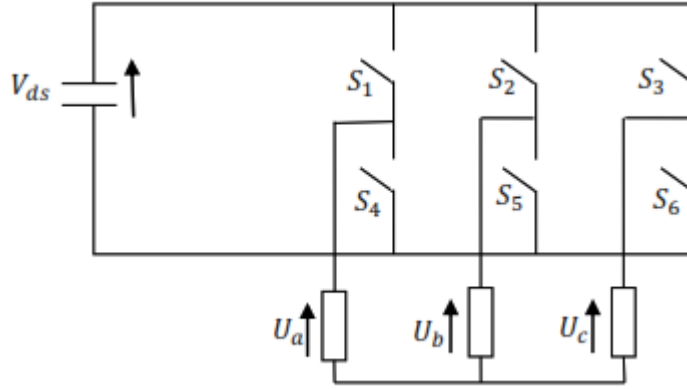


Figure (II.17) : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux [7].

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 :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (2.29)$$

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

$$\begin{cases} V_a = 1/3 \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (2.30)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dr}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

II.8.5.2 Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulées 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.16) [7].

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 :

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

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

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

II.8.5.3 Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [7]:

Tape 1:

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (2.34)$$

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

Tape 2:

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

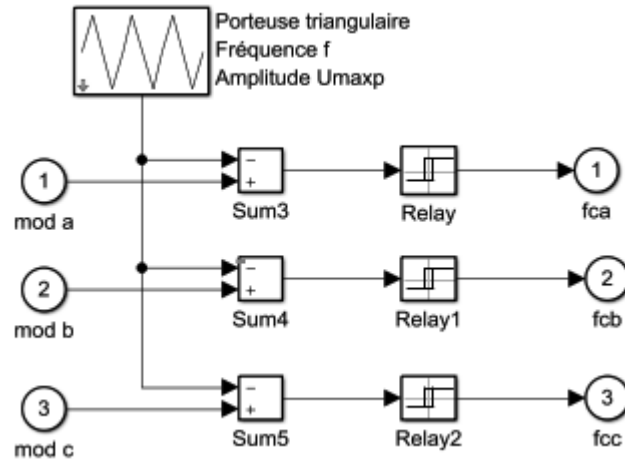


Figure (II.18) : Génération des Signaux de commande MLI de l'onduleur.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la machine asynchrone double alimentation que nous avons choisie grâce à ces avantages pour une utilisation dans le système éolien (réduction des coûts, amélioration de l'efficacité énergétique et possibilité d'obtenir plusieurs degrés de liberté qui facilitent son système). Puis nous avons présenté le modèle mathématique de MADA basé sur la transformation Park et quelques hypothèses simplifiées. D'autre part, nous avons choisi la stratégie de la commande vectorielle (avec orientation du flux statorique) pour contrôler la puissance active et réactive du stator.

Chapitre III : les énergies éoliennes à vitesse variable

III.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ses différents éléments sont conçues pour maximiser cette conversion énergétique, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne.

Dans un premier temps, les différentes parties constituant une éolienne sont d'écrites d'une façon générale. L'éolienne à vitesse variable est une technologie qui se développe de plus en plus, pour être intégrée dans les réseaux de moyenne tension. Différentes stratégies de commande seront d'écrites. Ces dernières sont différentes selon le point de fonctionnement fixé par la caractéristique puissance/vitesse. Ensuite, différentes techniques permettant de maximiser l'extraction de la puissance éolienne sont présentées.

La dernière partie de ce chapitre illustre les principales méthodes permettant de contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine.

III.2 Description de l'éolienne

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. à ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Lorsque des pales fixes sont utilisés, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au-delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall contrôle). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle l'éolienne pour démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

III.3 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale Figure (III.1), étant le sujet de notre étude, sera décrit en citant ses différents composants, en général, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- La tour : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. à l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique figure (III.1). Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.

- Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

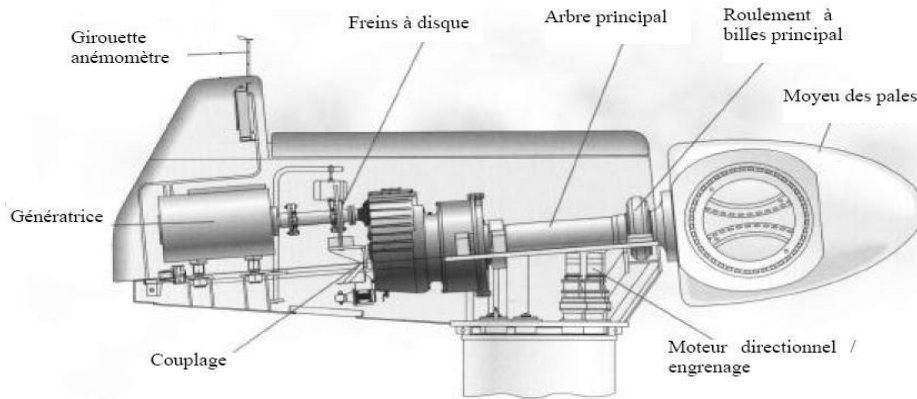


Figure (III.1) : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne [5].

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

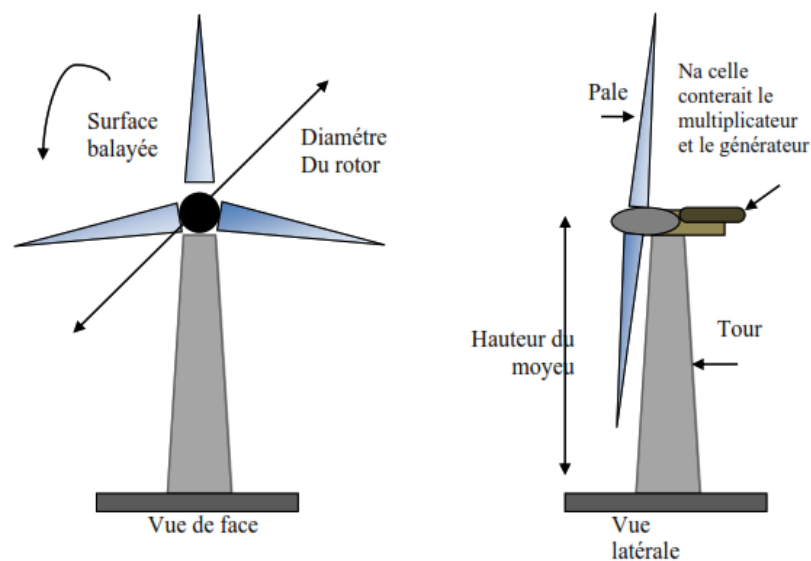


Figure (III.2) : Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal [5].

III.4 Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure (III.3) est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique

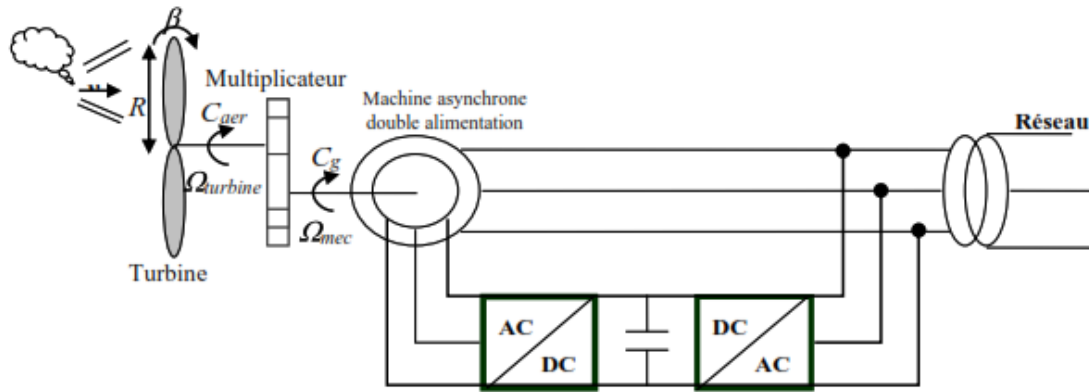


Figure (III.3): Eoliennes à vitesse variable[4].

La figure (III.4) montre les différentes configurations de fonctionnement de la Générateur asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, P_s , la puissance transitant par le stator, P_r , la puissance transitant par le rotor, et P_m , la puissance mécanique.

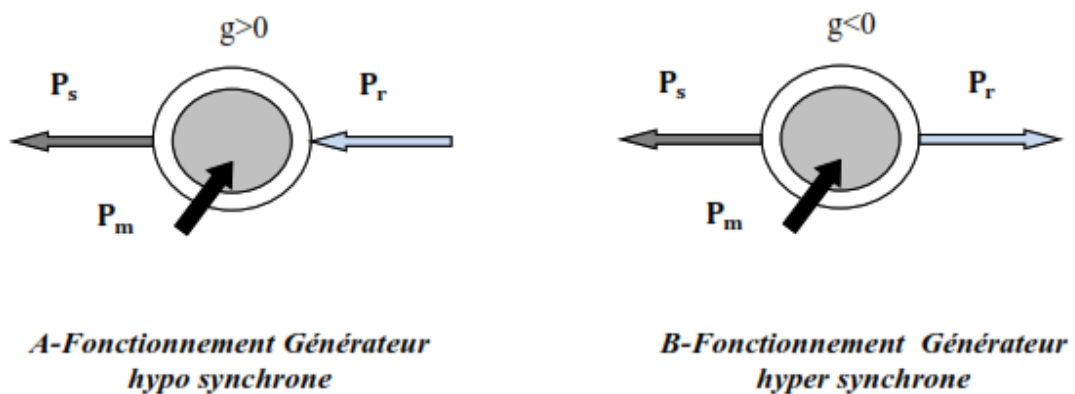


Figure (III.4): Les différents modes de fonctionnement de la GADA.

III.4.1 Génératrice en hypo synchronisme

La puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

III.4.2 Génératrice en hyper synchronisme

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

III.5 Modélisation des éoliennes

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'éoliennes à axe horizontales tri-pales. Aujourd'hui, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite les ont écartées du marché [13].

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain G de vitesse figure (III.5).

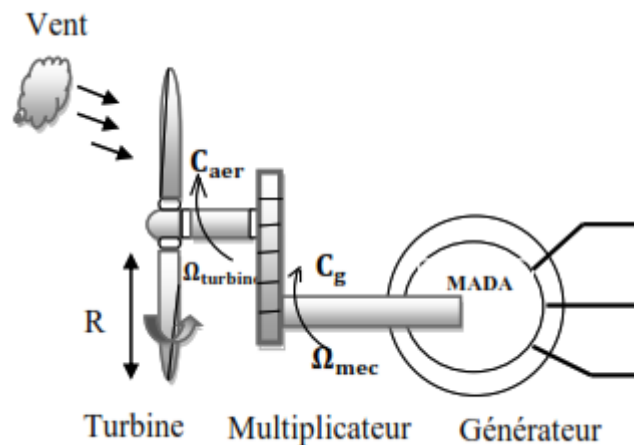


Figure (III.5) : Schéma d'un système éolien [14].

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (3.1)$$

Avec :

- ρ est la densité de l'air (approx 1.22kg/m à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine [m^2] de rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale $R[m]$.
- v est la vitesse du vent [m/s].

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda_0 \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (3.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (III.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β [12].

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (3.3)$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\Omega_r R}{v} \quad (3.4)$$

Où Ω_t est la vitesse de la turbine.

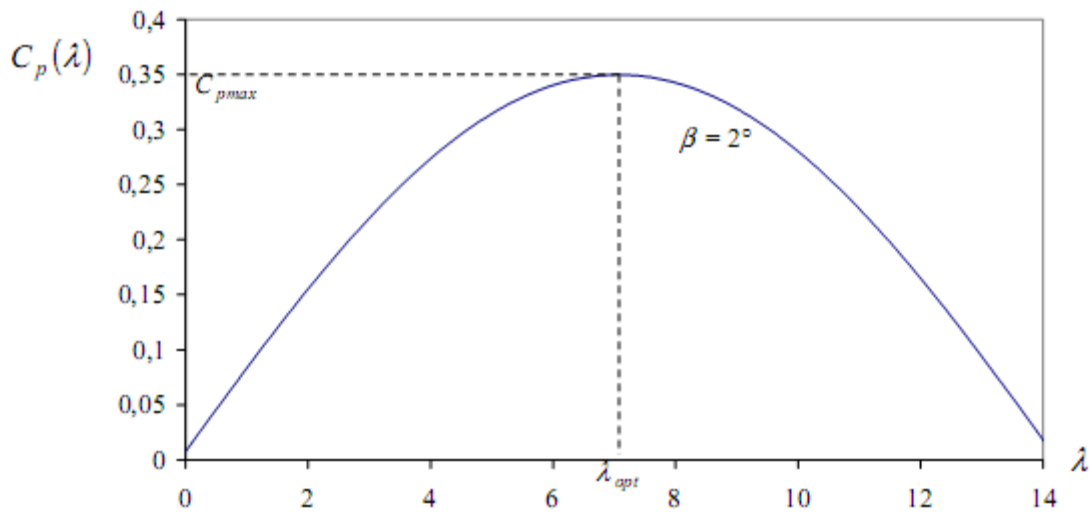


Figure (III.6) : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$.

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

$$C_{ear} = \frac{P_{ear}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (3.5)$$

III.5.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (III.5), ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (3.6)$$

III.5.2 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [14].

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (3.7)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne de 2MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [15]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J = \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (3.8)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.9)$$

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

$$C_{vis} = f.\Omega_{méc} \quad (3.10)$$

III.5.3 Schéma bloc du modèle de la turbine

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le schéma bloc correspondant à cette modélisation est représenté sur la figure (III.6).

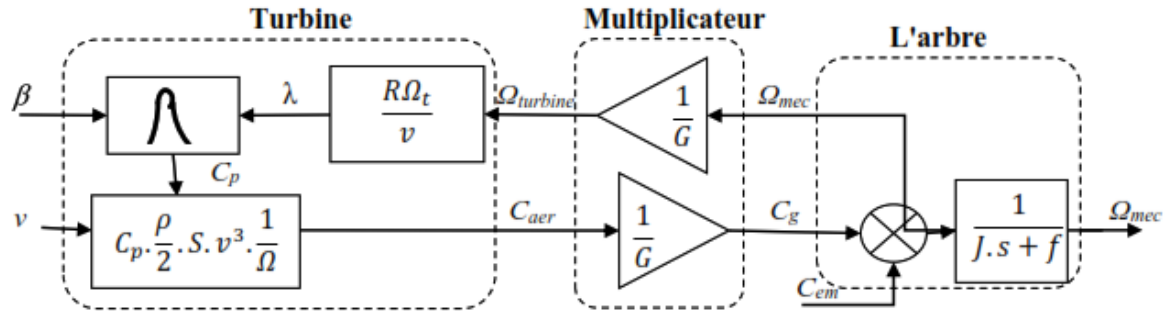


Figure (III.7) : Schéma bloc du modèle de la turbine[14].

III.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

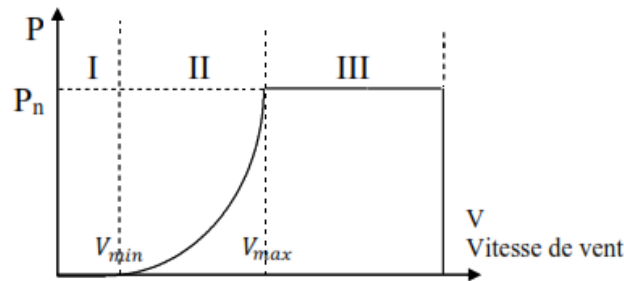


Figure (III.8) : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolien de grande puissance [13].

On distingue trois types de fonctionnement : la phase de démarrage et le partial (load) ou fonctionnement à charge partielle et le (full load) ou fonctionnement à pleine charge.

-**Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine.

-**Zone 2** : $(\lambda_{opt}, C_{p_{max}})$: dans cette zone que l'on nomme partial load1, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de λ_{opt} [5] Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p_{max}}$.

- **Zone 3** : (N_{nom}, P_{nom}) : Pour le full load, on cherche à maintenir constante la puissance électrique produite à sa valeur nominale en agissant sur l'angle de calage, dans cette dernière zone, la vitesse de rotation est toujours égale à sa valeur nominale mais cette fois-ci la puissance délivrée par l'éolienne a atteint sa valeur nominale [16].

III.7 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande

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

Dans notre travail nous nous intéressons au contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

III.7.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être envisagés.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples :

Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_{mec} + C_{em} - f \cdot \Omega_{mec}) \quad (3.11)$$

Le modèle de la turbine se simplifie. La structure de commande obtenue consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. On peut écrire :

$$C_{em-ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.12)$$

En prenant en compte le gain du multiplicateur on a

$$\Omega_{ref} = G\Omega_{turbine-ref} \quad (3.13)$$

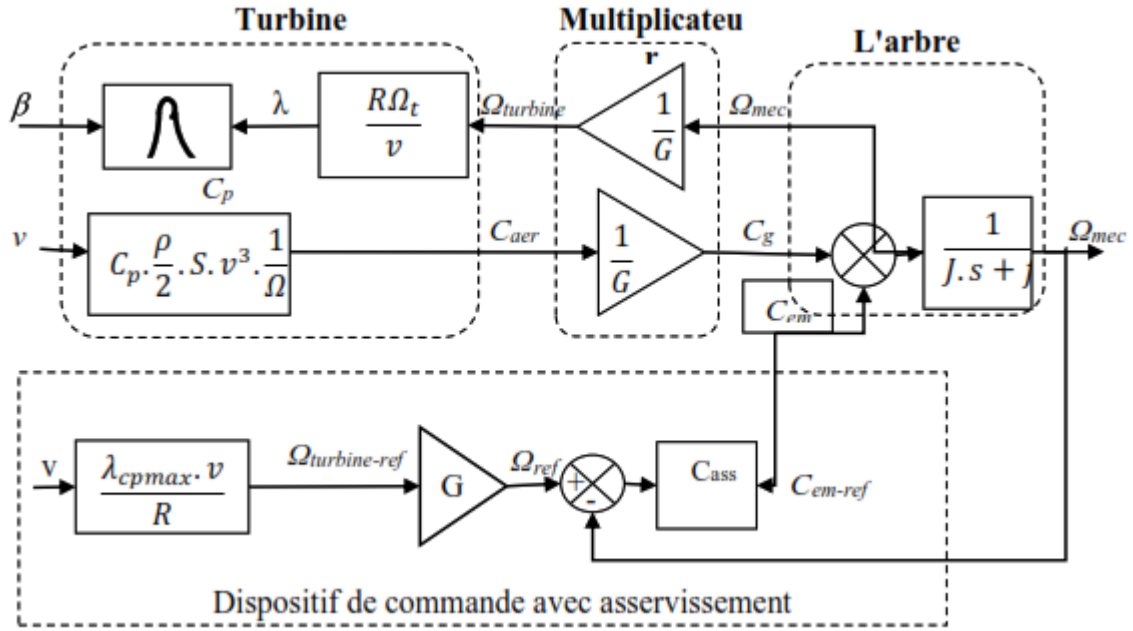


Figure (III.9) : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse [14].

III.7.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important, une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse. [17]

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse où la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (3.14)$$

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

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (3.15)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (3.15) :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} V_{estime}^3 \quad (3.16)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-estime}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (3.17)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (3.18)

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-est} R}{\lambda} \quad (3.18)$$

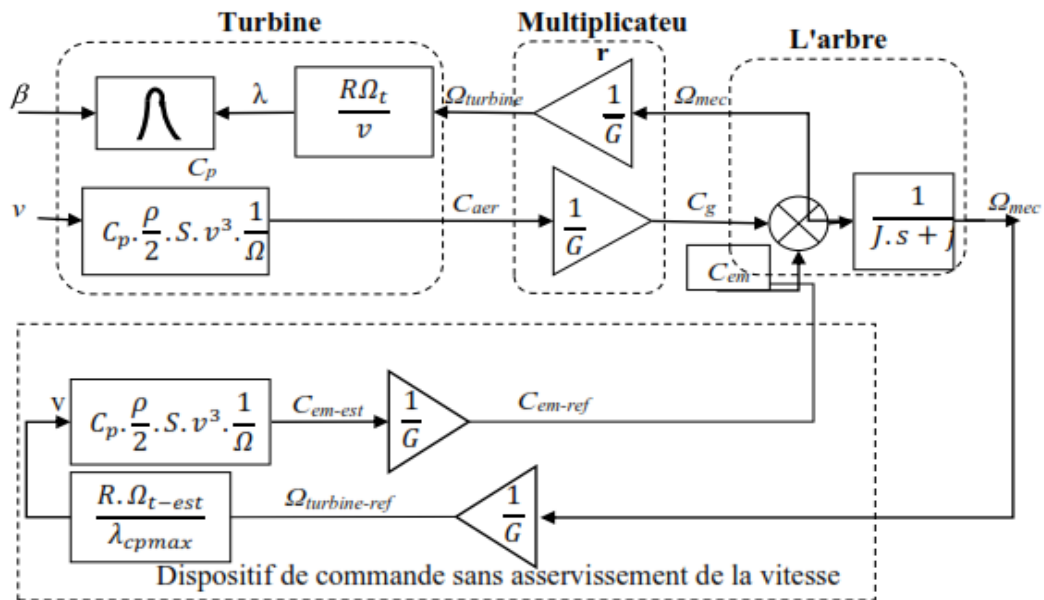


Figure (III.10) : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse [14].

III.7.3 Système d'orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch contrôle" figure (III.11).

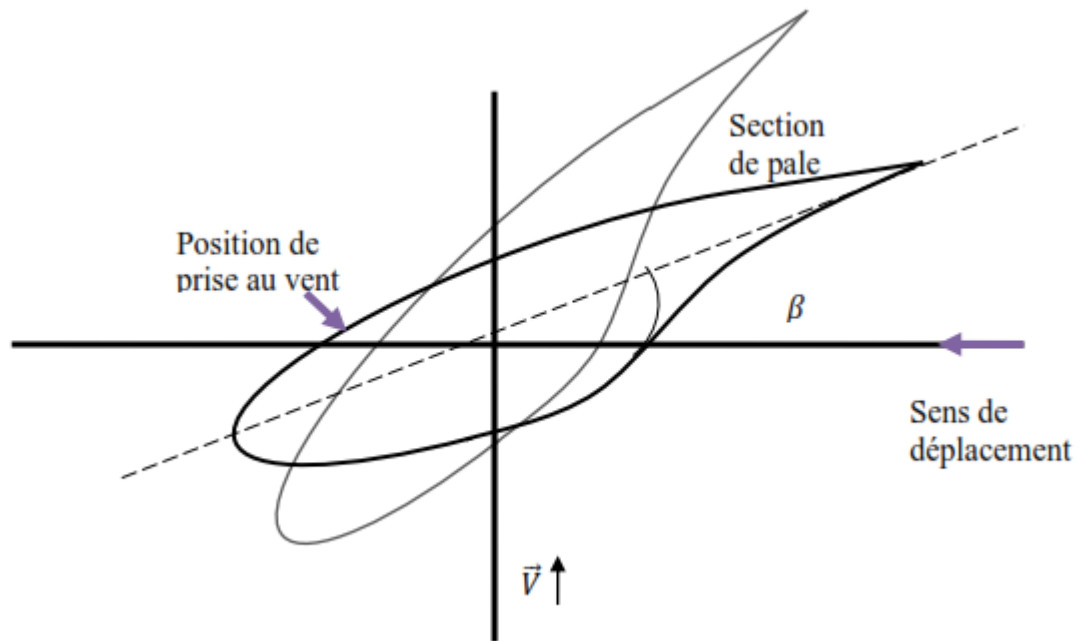


Figure (III.11) : Variation de l'angle de calage d'une pale [5].

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour de grader le coefficient de puissance à la valeur optimale. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale $V_{\max}$ [18].

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sûr en dessous de la limite de sécurité) [12].
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent [19].
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

III-8 Résultat de simulation :

Après avoir simulé le schéma sous *MATLAB_SIMULINK* avec les paramètres donnés en annexe, les résultats de simulation permettent d'observer l'évolution de différentes grandeurs qui interviennent dans cet algorithme. Nous avons obtenu les résultats illustrés sur les figures suivantes :

III -8-1 MPPT avec asservissement :

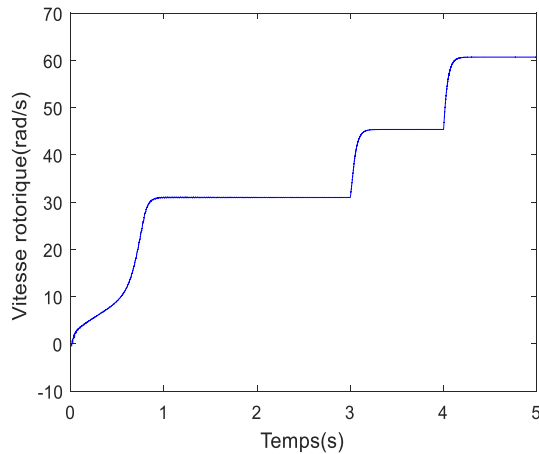


Figure (III.12): La vitesse rotorique

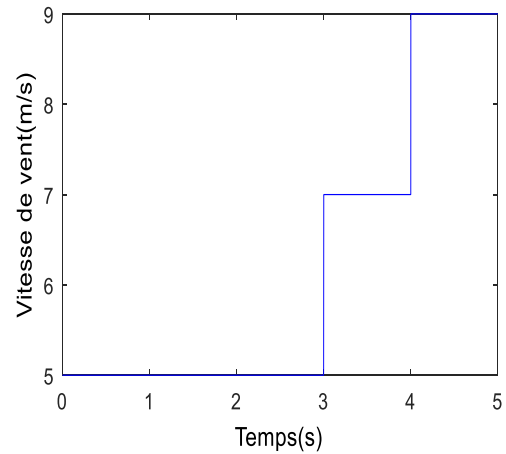


Figure (III.13): Vitesse de vent en fonction du temps.

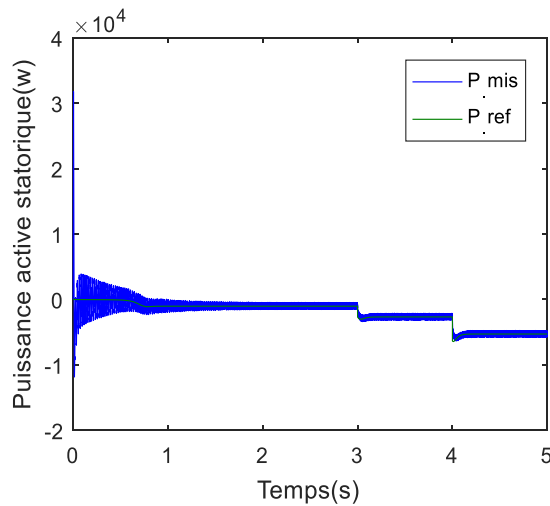


Figure (III.14) : Puissance active statorique.

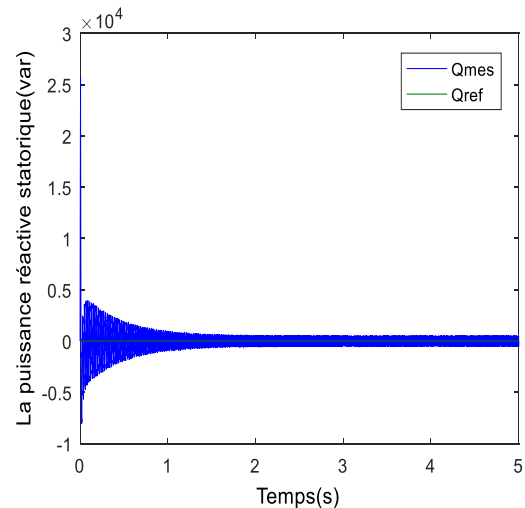


Figure (III.15) : Puissance réactive statorique et sa référent

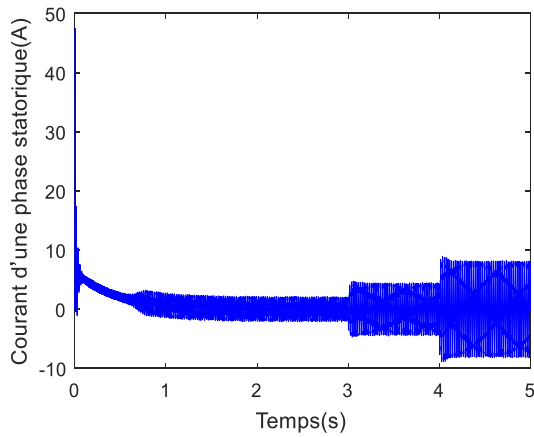


Figure (III.16) : Courant d'une phase statorique.

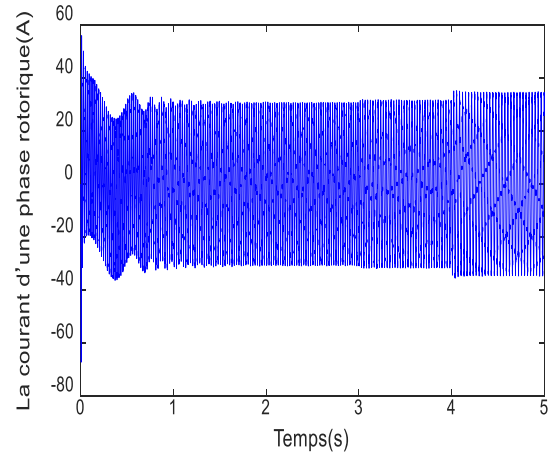


Figure (III.17) : Courant d'une phase rotorique.

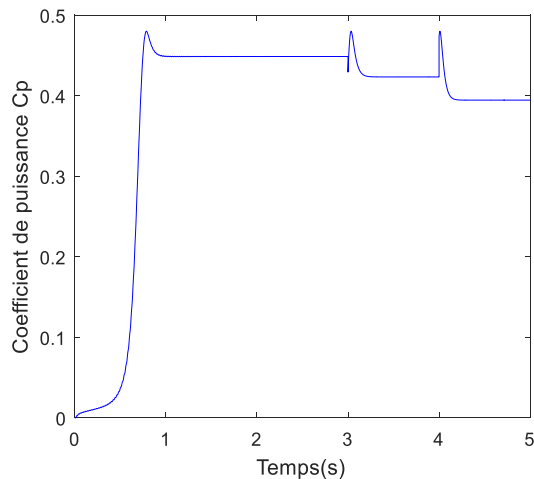


Figure (III.18): coefficient de puissance.

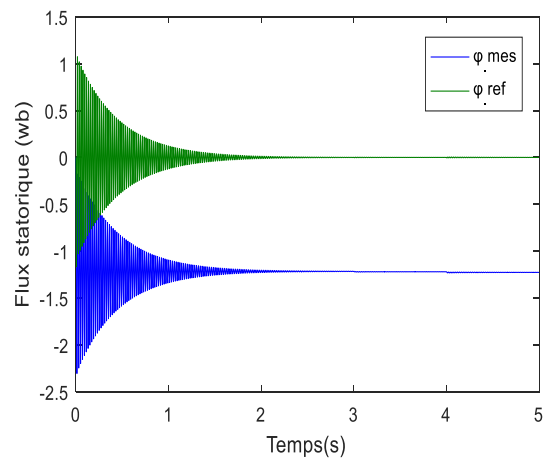


Figure (III.19) : Flux statorique de la MADA

Interprétation :

Les figures présentent les résultats de simulation du système éolien commandé par la stratégie MPPT avec asservissement de la vitesse.

On distingue qu'il est clair que la vitesse de la machine suit fidèlement celles des différentes valeurs de vent figure (III.12) et (III.13).

Et le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs le coefficient de puissance est obtenu pour angles de calage ($B=0$) figure (III.19).

Les coefficients de puissance C_p restent pratiquement égaux à leur valeur de référence optimale et n'est pas ajusté à sa valeur maximale.

L'allure des composantes du flux statorique montre une bonne orientation du flux garantissant une commande vectorielle bien découplée de la MADA figure (III.18).

La puissance éolienne capturée suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil de vent appliqué Figure (III.14) et Figure (III.15).

III -8-2 MPPT sans asservissement :

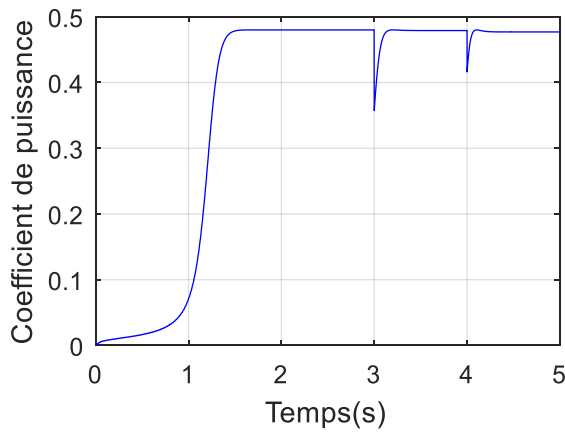


Figure (III.20) : coefficient de puissance

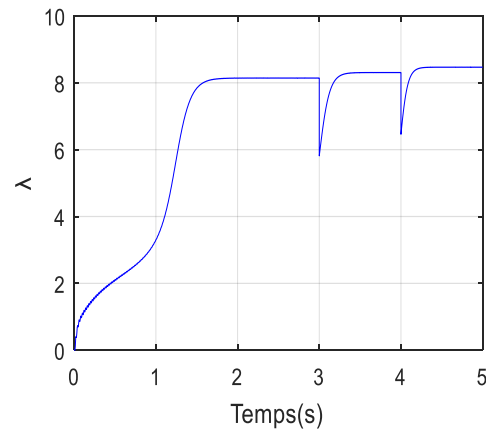


Figure (III.21) : Vitesse relative de l'éolienne

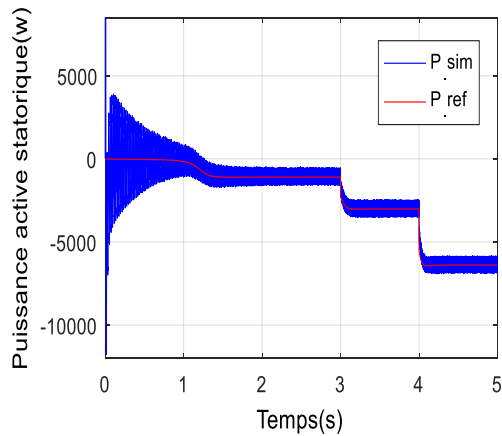


Figure (III.22) : Puissance active statorique.

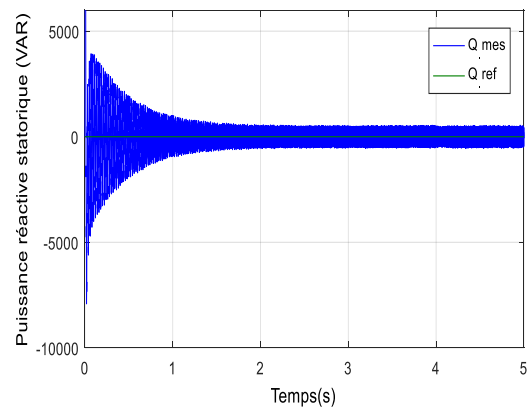


Figure (III.23): Puissance réactive statorique.

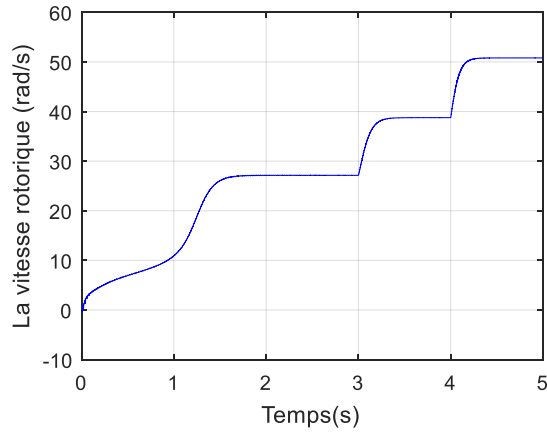


Figure (III.24) : La vitesse rotorique estimée par d'observateur mode glisse adaptative.

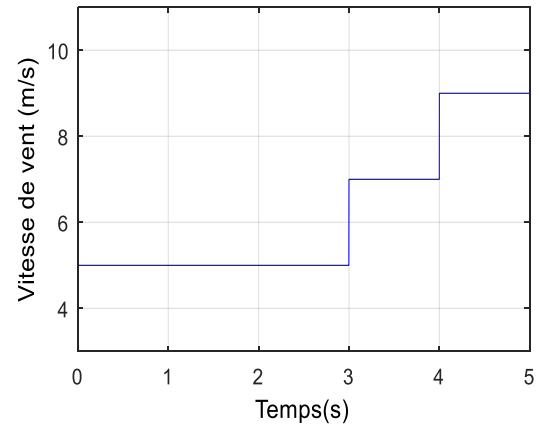


Figure (III.25) : Vitesse de vent en fonction du temps.

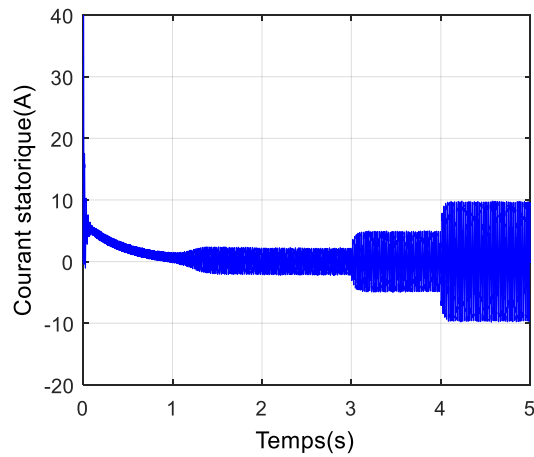


Figure (III.26) : Courant d'une phase statorique.

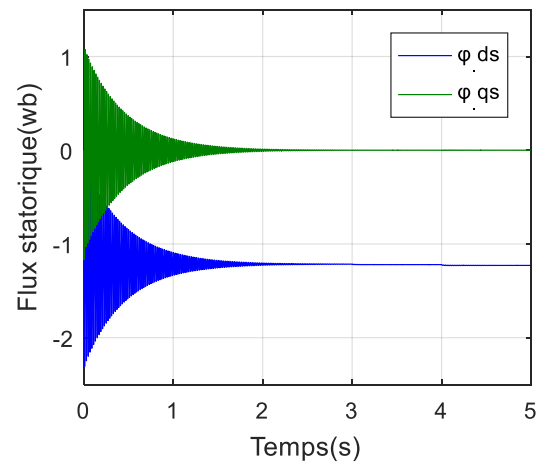


Figure (III.27) : Flux statorique de la MADA.

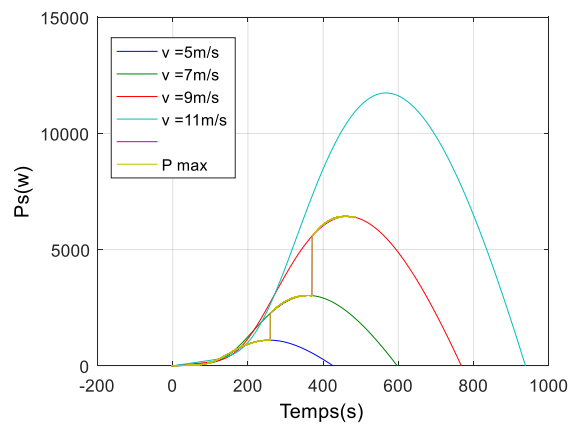


Figure (III.28) : MPPT de l'éolienne

Interprétation

Les figures présentent les résultats de simulation du système éolien commandé par la stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse.

On remarque qu'après l'application se profile de vent sur les pales de la turbine la valeur de coefficient de puissance (**C_p**) reste à la valeur de $C_p \text{ max}$ (0.49) (figure III. 20).

Dans ce cas un coefficient de puissance maximale et un ratio de vitesse optimale ont maintenu comme les montrent les figures (III.20) et (III. 21).

Et le rapport ratio de la vitesse (λ) varie légèrement autour de sa valeur optimale (8.1) (figure III.21).

Les résultats de simulation montrent que les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent (figure III.24).

L'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 figure (III.28).

Finalement, ce qui indique que la méthode MPPT avec asservissement nous permet de contrôler la vitesse de la génératrice par rapport à la commande MPPT sans asservissement.

Les résultats obtenus pour les deux stratégies de contrôle MPPT (avec et sans asservissement de vitesse) montrent des bonnes performances statiques et dynamiques, un temps de réponse souhaitable offerte par les deux techniques, ce qui justifie le choix de la méthode MPPT pour le contrôle de la turbine.

III -9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté la chaîne de conversion proposée afin de comprendre le principe de fonctionnement et aussi traité de la modélisation et simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA nous avons donc centré notre étude sur la commande de la turbine éolienne dans la zone de fonctionnement optimale permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent, et les différentes techniques de maximisation de la puissance extraite de la turbine la réalisation de la stratégie MPPT se font par deux commandes: sans et avec asservissement de la vitesse ont été explicitées.

***Chapitre IV: Commande sans
capteur de la GADA associé à
un observateur adaptatif***

IV.1. Introduction

Les grandeurs d'état utilisées pour l'élaboration de la commande de la GADA Sont souvent difficilement accessibles pour des raisons techniques ou économiques (difficulté voire impossibilité de mesure, fragilité, encombrement, coût de montage et d'entretien...etc.).

Les capteurs dédiés représentent le maillon faible de la chaîne, on essaye donc de faire Remplir leurs fonctions par des capteurs de grandeurs électriques.

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 qu'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 adaptatif mode glisse.

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 traite la commande sans capteur de vitesse de la machine [20].

- **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 [21].

- **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 [22].

- **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 ventilement 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) [19], Le filtre de Kalman est un observateur non linéaire en boucle fermée dont la matrice de gain est variable. À 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 soient par un algorithme génétique [24]. 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 [25], [26]. 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 [27]. 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 [28],[27]. 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

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

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

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

En plus :

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

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

L'observateur par mode glissant peut s'écrire

$$\hat{X} = A\hat{X} + BU + G.(Y - C\hat{X}) \quad (4.1)$$

G : est la matrice de gain

L'observateur peut s'écrire

$$\hat{X} = (\hat{A} - G.C)\hat{X} + BU + G.Y \quad (4.2)$$

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 :

$$E = (A - GC)E + \Delta A\hat{X} \quad (4.3)$$

Où

$$\begin{cases} \Delta A = (A - \hat{A}) \\ \Delta \omega_r = (\omega_r - \hat{\omega}_r) \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\Delta A = \Delta \omega_r \begin{pmatrix} 0 & \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{M}{\sigma L_s} \\ -\frac{M^2}{\sigma L_s L_r} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma} \\ \frac{M}{\sigma L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$$

Maintenant, considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = E^T E + \frac{1}{KL} \Delta \omega_r \quad (4.5)$$

Où :

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

K_{or} : 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

$$\hat{\omega}_r = K \int E^T \Delta A \hat{X} dt \quad (4.6)$$

Où

$$\hat{\omega}_r = k \int e_d \left(\frac{M^2}{\partial L_s L_r} \hat{i}_{sq} + \frac{M^2}{\partial L_s} \hat{i}_{rq} \right) - e_q \left(\frac{M^2}{\partial L_s L_r} \hat{i}_{sd} + \frac{M^2}{\partial L_s} \hat{i}_{rd} \right) dt \quad (4.7)$$

Ce qui signifie

$$\hat{\omega}_r = k \int \frac{M^2}{\partial L_s L_r} (e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) + \frac{M^2}{\partial L_s} (e_q \hat{i}_{rd} - e_d \hat{i}_{rq}) dt \quad (4.8)$$

Nous pouvons négliger les valeurs de a_1, a_3 parce que ses faibles valeurs comparées par a_2 , le mécanisme d'adaptation devient :

$$\hat{\omega}_r = k \int a_2 (e_{pd} \hat{i}_{cq} - e_{pq} \hat{i}_{cd}) dt \quad (4.9)$$

k : est une constante positive.

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

$$\hat{\omega}_r = Kp(e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) + Ki \int (e_d \hat{i}_{sq} - e_q \hat{i}_{sd}) dt \quad (4.10)$$

La structure générale de l'observateur adaptative est donnée par la figure suivant :

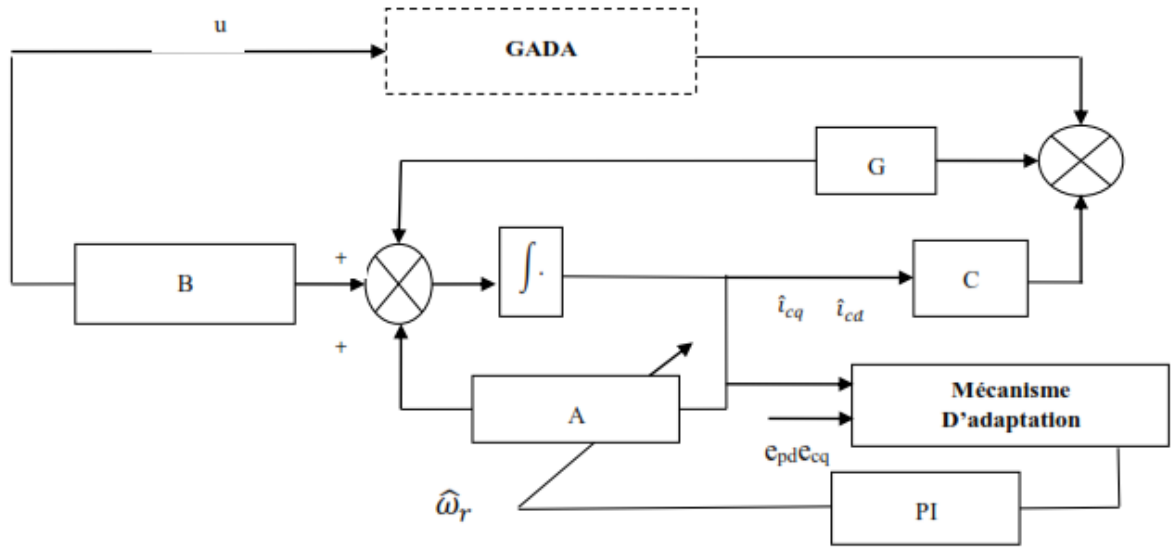


Figure (IV-1) : Configuration de l'observateur adaptative.

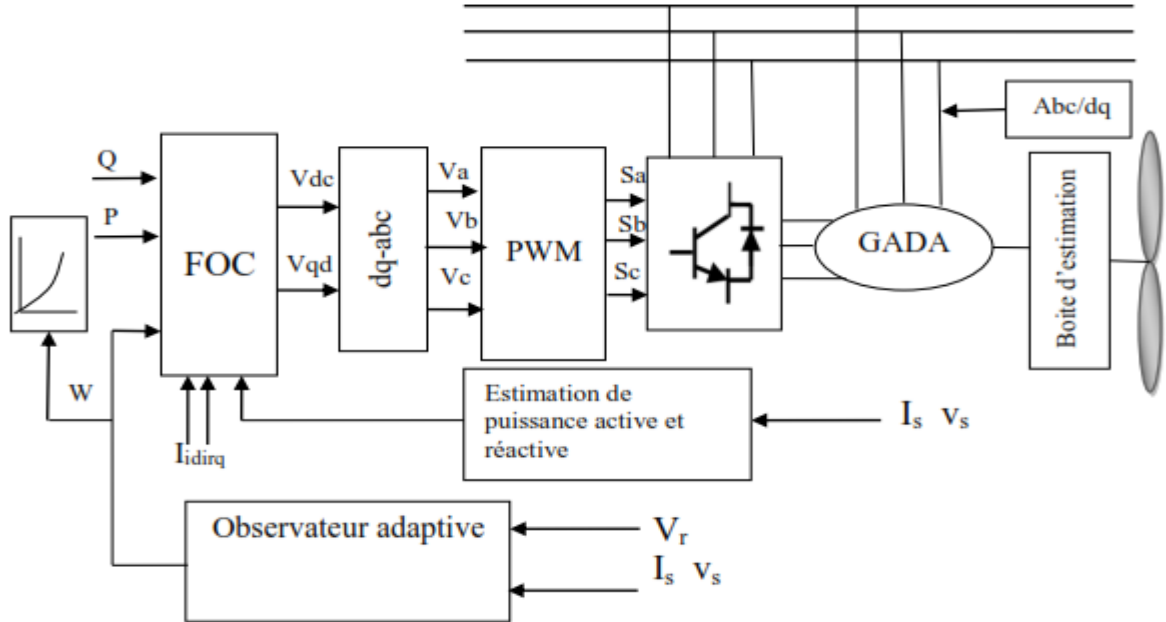


Figure (IV-2) : Commande sans capteur de vitesse mécanique de la GADA basée sur un observateur adaptative dans un système éolien à vitesse variable

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-12), il est clair que la vitesse estimée suit fidèlement celles de la vitesse réelle dans différentes valeurs de vent.

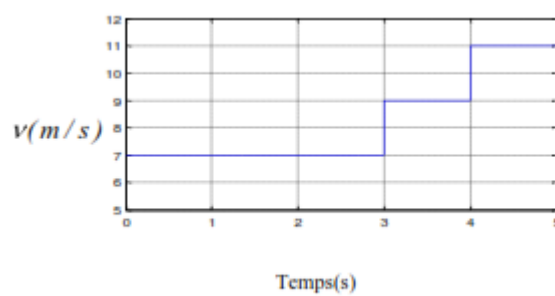


Figure (IV.3) Vitesse de vent en fonction du temps.

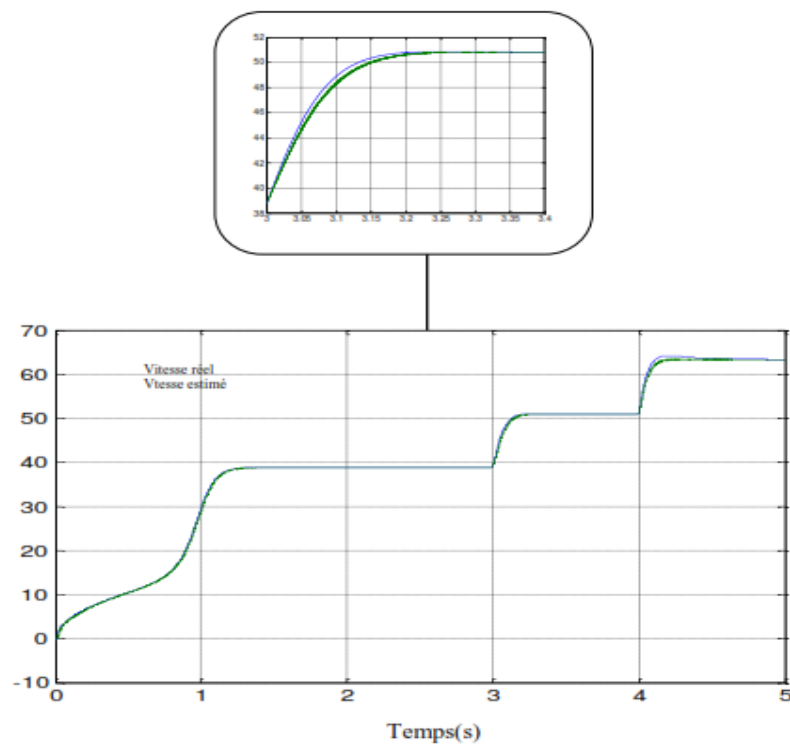


Figure (IV.4): La vitesse rotorique estimée par d'observateur adaptative avec Zoom.

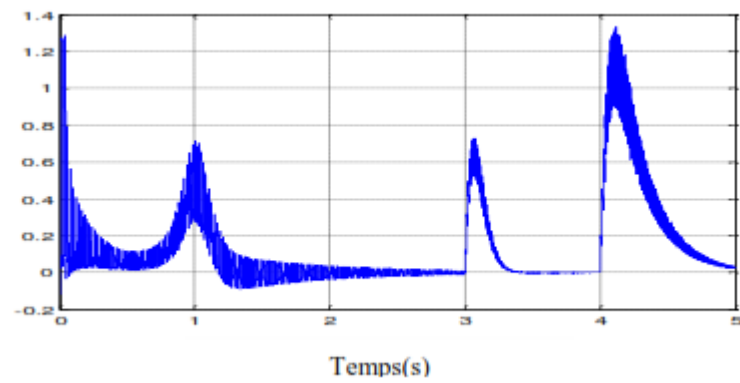


Figure (IV.5) : Erreur de la vitesse estimée.

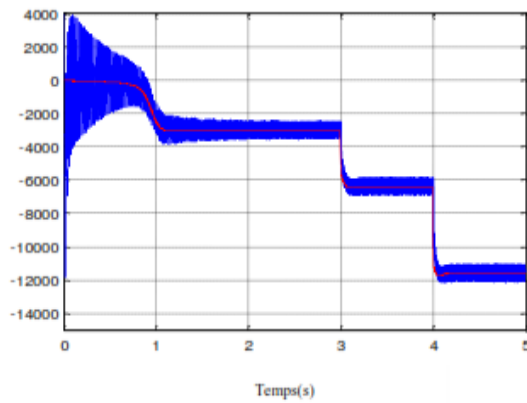


Figure (IV-6): Puissance active statorique

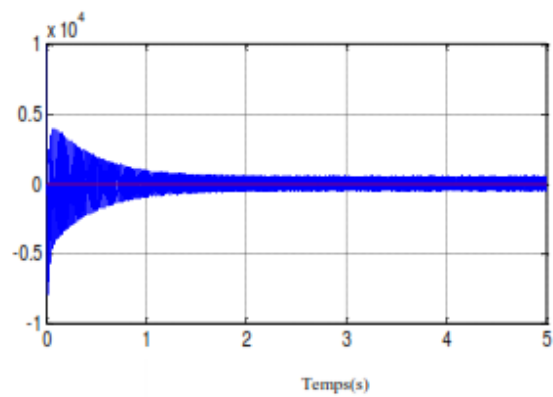


Figure (IV-7): Puissance réactive statorique
et sa référent sa référence

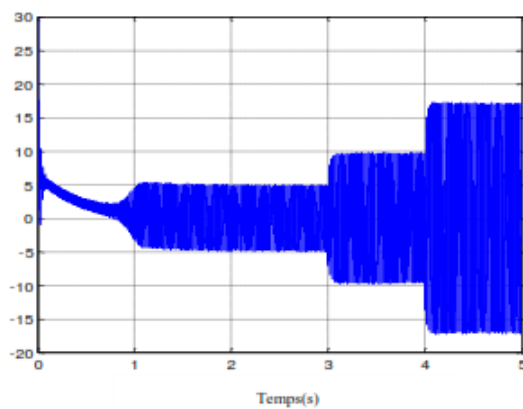


Figure (IV.8): Courant d'une phase
statorique.

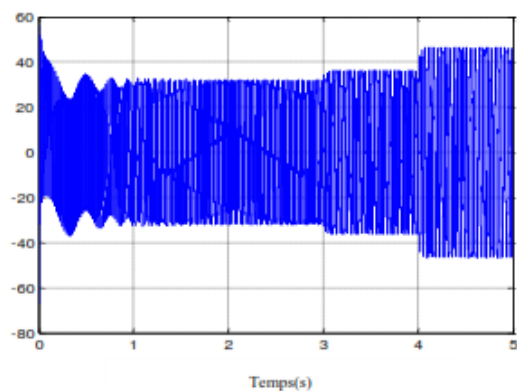


Figure (IV.9) : Courant d'une phase
rotorique

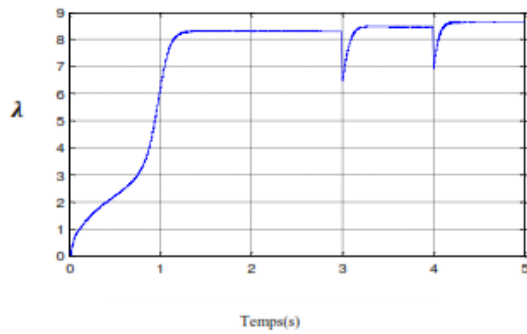


Figure (IV.10): Vitesse relative de l'éolienne

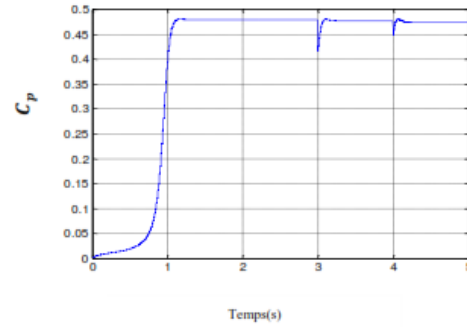


Figure (IV.11): Coefficient de puissance de la turbine

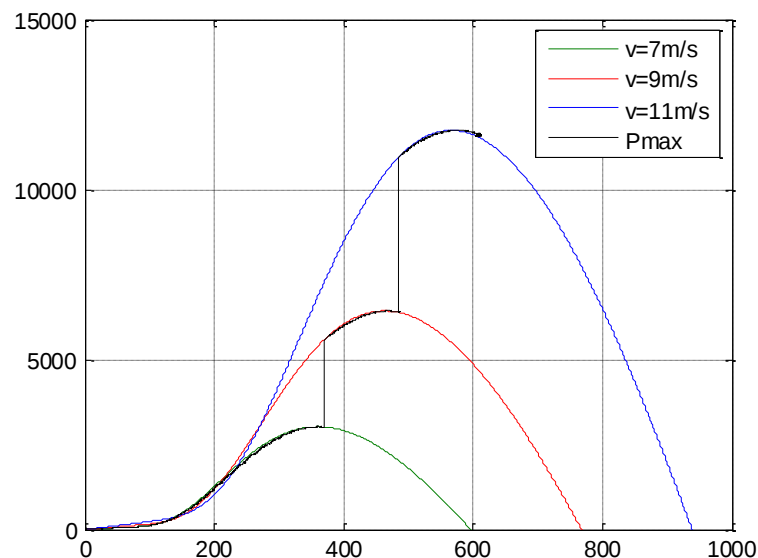


Figure (IV-12) : MPPT de l'éolienne

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 profile 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

(Cp) 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 de la génératrice asynchrone double alimentation. Ensuite, les principes des observateurs d'états ont été traités, d'abord avec l'observateur de type d'observateur 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 l'observateur adaptative est satisfaisante et montre une bonne réponse dynamique au démarrage.

Conclusion

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système d'éoliennes à vitesse variable à base d'une MADA.

Le travail présenté dans cette mémoire avait quatre chapitres :

Le premier chapitre nous avons commencé par introduction sur l'énergie éolienne précisément (historique, différents types, constitution, et principe de fonctionner). Ainsi les différents génératrices et convertisseurs utilisés dans les éoliennes (à vitesse fixe et variables).

Pour le douzième chapitre a été consacré à la simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à doublement alimentée (MADA) qui sont la plus répondues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, en utilisant la technique MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent.

Troisième chapitre concernait le principe de conversion du vent, on a présenté l'équation de la puissance de vent et coefficient de puissance (C_p), la loi de BETZ, l'effet de variation de l'angle calage (β) sur le rendement de l'éolienne, puis on a établi le modèle mathématique de la turbine après le principe de MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent par le système éolien, deux méthodes utilisant le contrôle MPPT ont été examinées : avec et sans asservissement de la vitesse de rotation. Les résultats obtenus par la stratégie MPPT ont montré que les deux méthodes donnent des résultats similaires.

Pour le quatrième et le dernier chapitre nous avons abordé la commande sans capteur de vitesse par l'observateur adaptatif (définition, après avoir présenté les différentes méthodes d'estimation de la vitesse mécanique etc.), Les résultats de simulation montrée des performances assez satisfaisantes.

Les performances de cette commande ont été justifiées par la simulation. Les résultats de cette étude ont affirmé ceux de la troisième et le quatrième chapitre.

En résumé, ce modeste travail de recherche sur la commande sans capteur d'une génératrice asynchrone à double alimentation par l'observateur adaptatif, nous a permis d'avancer ce qui suit :

- ✓ Les résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables en utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée la technique d'observateur adaptatif.

- ✓ Enfin on peut dire que la commande robuste sans captures mécaniques au système de conversion d'énergie éolien équipé d'une génératrice asynchrone à double alimentation est améliorée quand on ajoute l'observateur adaptatif.
- ✓ Utilisation d'autres régulateurs (non-linéaires) pour améliorer les performances obtenues.

Toutefois et à défaut de temps, plusieurs points n'ont pas été traités et ouvrent les portes vers beaucoup d'améliorations.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] L. Khettache, "Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [2] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [3] Z.TIR « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [4] B. Kelkoul « Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de Magister API, Université de TLEMCEM ,2011.
- [5] L. Khelfat et L. Maataoui « Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée » MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA,2017.
- [6] S. Kaddouri et A. Raddad « Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par Mode de Glissement » Mémoire de Fin d'études pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'état en électrotechnique, Centre Universitaire d'El-oued,2011.
- [7] Y. Moussaoui et H. Mounir « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued,2015.
- [8] Y. Hocini « COMMANDE D'UNE GENERATRICE POUR ENERGIE EOLIENNE » MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF,2013.
- [9] L. Baghli, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [10] S Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une Mada », thèse de Magister, École nationale polytechnique Alger 2009.
- [11] F. merrahi., « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) » thèse de magister de l'école Nationale polytechnique,2007.
- [12] S. El aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension ». Thèse doctorat, Ecole centrale de lille2004
- [13] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

- [14] N. Hamdi, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », thèse de de magister Université de Constantine, 2008
- [15] E. De Vries, «Wind turbines technology trends », Vol.6, No.4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August2003.
- [16] V. Rogez « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux, application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de doctorat Université d'Artois, 2004.
- [17] E. Muljadi, «Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation», IEEE Transaction on Industry Application, Vol.37, No 1, Jan/Feb.2001.
- [18] M. Smaili « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » thèse de magister université du Quebec en Abitibi -Temiscamingue.Aout2013.
- [19] F. Saadi « Commande d'un Convertisseur Électromécanique : Application à un Système Éolien » diplôme de Magister en Electrotechnique, Université de Constantine.2013
- [20] A. Bouhedda,"contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne "thème de magister d'université Mouloud Mammeri, tizi-ouzou,2011
- [21] 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
- [22] L. Baghli, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005
- [23] A. Boyette, “Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [24] A. Boulahia, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", thèse de magister, université de Constantine, 2009
- [25] 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
- [26] H. Serhoud, D. Benattous ‘‘ 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
- [27] N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.

- [28] B. Beltran,"contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice Asynchrone Double alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode glissant D'ordre supérieur "thèse de Doctorat Université de bretagne Occidentale,2010

Annexes

Annexe(A)

1.machine à induction double alimentée :

Paramètre	Valeur numérique
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	0.0024 N.m.s/rad

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.

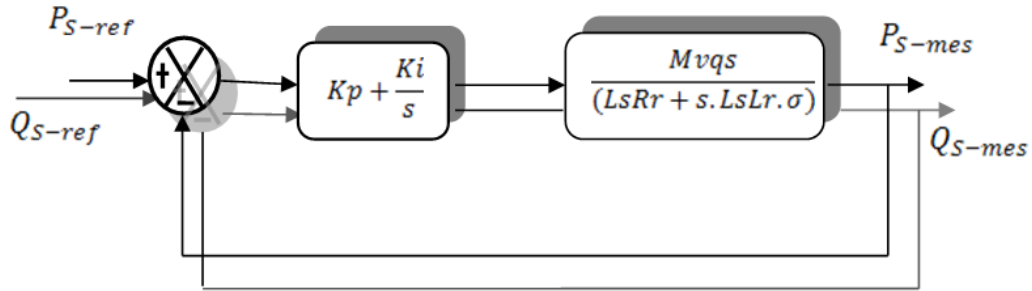


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

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

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

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

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

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

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

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

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**

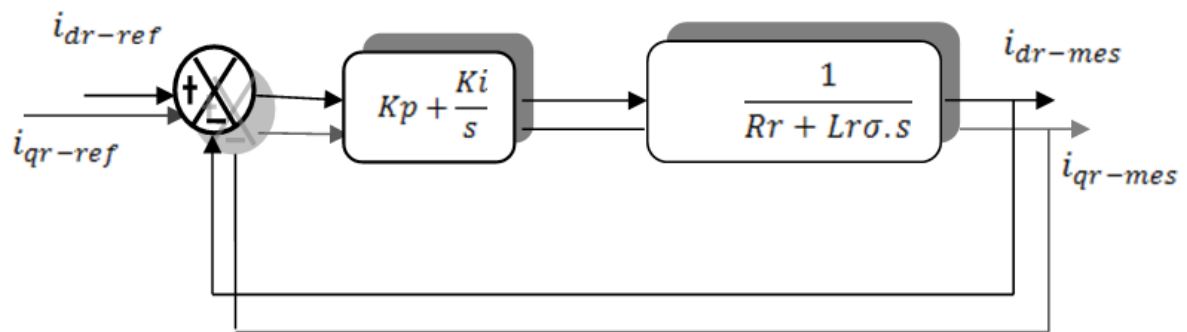


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique.

⇒ **Boucle de vitesse**

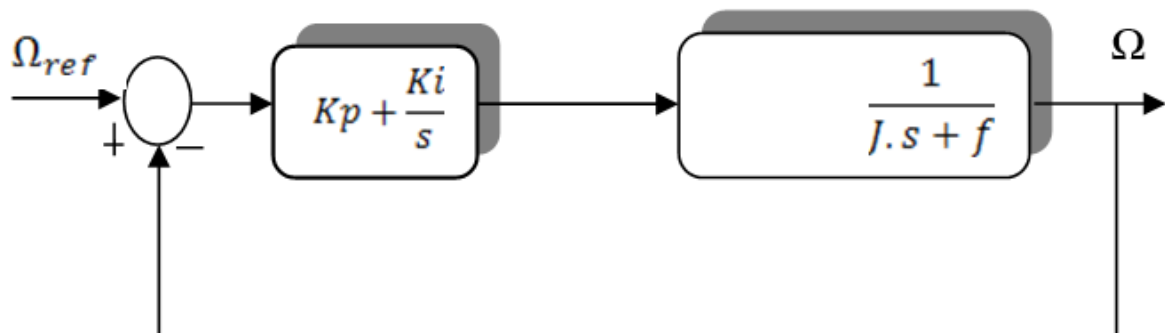


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

Paramètres du régulateurs PI classique :

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